

TUGAS AKHIR - TM 184835

SIMULASI NUMERIK KARAKTERISTIK ALIRAN MELINTASI DUA SILINDER SINGKULAR TERSUSUN TANDEM DEKAT DINDING MIRING

RIDA ARIFAH
NRP 02111540000061

Dosen Pembimbing
Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT.

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019



TUGAS AKHIR - TM 184835

**SIMULASI NUMERIK KARAKTERISTIK ALIRAN
MELINTASI DUA SILINDER SINGKULAR
TERSUSUN TANDEM DEKAT DINDING MIRING**

RIDA ARIFAH
NRP 02111540000061

Dosen Pembimbing
Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT.

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019



UNDERGRADUATE THESIS - TM 184835

**NUMERICAL SIMULATION OF FLOW
CHARACTERISTICS AROUND TWO CIRCULAR
CYLINDER IN TANDEM ARRANGEMENT NEAR
INCLINED WALL**

RIDA ARIFAH
NRP 02111540000061

Supervisor
Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT.

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2019

**SIMULASI NUMERIK KARAKTERISTIK
ALIRAN MELINTASI DUA SILINDER SIRKULAR
TERSUSUN TANDEM DEKAT DINDING MIRING**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

RIDA ARIFAH

NRP. 02111540000061

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir

1. Dr. Wawan Aries Widodo, ST, MT
NIP. 197104051997021001
2. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng, PhD
NIP. 196412281990031002
3. Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA
NIP. 196001291987011001
4. Vivien Suphandani, ST, ME, PhD
NIP. 19810529200312201



SURABAYA

JANUARI, 2019

SIMULASI NUMERIK KARAKTERISTIK ALIRAN MELINTASI DUA SILINDER Sirkular Tersusun TANDEM DEKAT Dinding Miring

Nama : Rida Arifah
NRP : 02111540000061
Departemen / Fakultas : Teknik Mesin / FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Wawan Aries Widodo, ST, MT

ABSTRAK

Silinder sirkular yang berinteraksi dengan fluida adalah salah satu bentuk yang umum digunakan pada rekayasa teknik. Salah satu elemen struktural yang berbentuk silinder sirkular yaitu pipa. Instalasi perpipaan yang didirikan berkelompok atau dalam susunan tertentu sering ditemukan dalam bangunan industri. Salah satunya pada instalasi perpipaan di atas tanah untuk mengalirkan minyak dari sumur produksi menuju kilang minyak di daratan (Onshore) untuk diolah. Peletakan instalasi perpipaan di atas tanah pada umumnya diletakkan dengan jarak tertentu dari permukaan tanah baik pada permukaan tanah yang datar atau dengan kemiringan tertentu.

Tugas akhir ini menggunakan metode simulasi numerik dua dimensi steady dan incompressible flow menggunakan software CFD Ansys Fluent versi 19.1 untuk mengetahui karakteristik aliran melintasi dua silinder sirkular disusun tandem di dekat dinding miring. Bilangan Reynolds yang digunakan dalam simulasi ini sebesar 5×10^4 dengan kecepatan inlet sebesar 20 m/s. Variasi yang dilakukan pada penelitian ini adalah rasio besar celah silinder sirkular dengan dinding (G/D) berturut-turut 0,1, 0,2, 0,3, 0,4, 0,5, dan 1, serta variasi kemiringan dinding (α) pada 0° , 10° , dan 20° . Rasio jarak longitudinal antar dua silinder sirkular (L/D) = 1,5 dibuat konstan. Pemodelan turbulence viscous yang digunakan adalah shear stress transport $k-\omega$.

Hasil yang didapat dari simulasi numerik secara kualitatif menunjukkan bahwa peningkatan (G/D) akan mengurangi pengaruh blockage dan peningkatan (α) akan membentuk wake akibat inclined wall serta meningkatkan pengaruh adverse pressure gradient. Hasil yang didapat secara kuantitatif yaitu peningkatan G/D dan α akan meningkatkan trendline CD_p dan menurunkan trendline CL_p pada silinder-1 serta menurunkan trendline CD_p dan meningkatkan trendline CL_p pada silinder-2. Tinjauan pada α dapat disimpulkan bahwa peningkatan α pada setiap G/D akan menurunkan nilai CD_p dan CL_p pada silinder-1 serta meningkatkan CD_p (tetap bernilai negatif) dan menurunkan CL_p pada silinder-2. Dapat disimpulkan bahwa pada jarak (L/D) = 1,5 menunjukkan gaya drag yang semakin rendah pada silinder-2. Hal ini disebabkan oleh free shear layer silinder-1 melingkupi silinder-2 pada $\alpha = 0^\circ$ dan 10° . Namun pada $\alpha = 20^\circ$ pengurangan gaya drag silinder-2 diakibatkan oleh wake step dari inclined wall.

Kata Kunci: dua silinder sirkular, susunan tandem, dinding miring, drag dan lift coefficient, wake step.

NUMERICAL SIMULATION OF FLOW CHARACTERISTICS AROUND TWO CIRCULAR CYLINDERS IN TANDEM ARRANGEMENT NEAR INCLINED WALL

Nama : Rida Arifah
NRP : 02111540000061
Departemen / Fakultas : Teknik Mesin / FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Wawan Aries Widodo, ST, MT

ABSTRACT

Circular cylinders that interact with fluid are one of the forms commonly used in engineering. One of the circular cylindrical structural elements is the pipe. Piping installations that are erected in groups or in certain structures are often found in industrial buildings. One of them is in the above-ground pipeline installation to drain oil from the production well to the onshore oil refinery for processing. Laying of piping installation on land is generally placed at a certain distance from the surface of the ground either on a flat surface or with a certain inclined wall.

This final project uses a steady and incompressible flow numerical simulation method using Ansys Fluent version 19.1 CFD software to determine the flow characteristics across circular cylinders arranged in a tandem near inclined wall. The Reynolds number used in this simulation is 5×10^4 with an velocity inlet of 20 m / s. Variations carried out in this research are the ratio of the circular cylinder gap to the lower wall (G / D), respectively 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, and 1, as well as variations in the inclined wall angle (α) at 0° , 10° , and 20° . The longitudinal distance ratio between two circular cylinders (L / D) = 1.5 is made constant. The turbulence viscous modeling used is shear stress transport $k-\omega$.

The results obtained from numerical simulations qualitatively indicate that an increase (G / D) will reduce the effect of blockage and increase (α) will form wake due to inclined wall

and increase the effect of adverse pressure gradient. The results obtained quantitatively, namely *an increase in G / D and α will increase the CDp trendline and reduce the CLp trendline on cylinder-1 and reduce the CDp trendline and increase the CLp trendline on cylinder-2. A review of α can be concluded that an increase in α for each G / D will decrease the value of CDp and CLp on cylinder-1 and increase CDp (still negative) and decrease CLp on cylinder-2. It can be concluded that at distance $(L / D) = 1.5$ shows the drag force which is lower on cylinder-2. This is caused by free shear layer cylinder-1 surrounding cylinder-2 at $\alpha = 0^\circ$ and 10° . But at $\alpha = 20^\circ$ the reduction of drag force in cylinder-2 is caused by a wake step from the inclined wall..*

Keywords: two circular cylinders, tandem arrangement, inclined wall angle, drag and lift coefficient, wake step.

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT, atas limpahan Rahmat dan Karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini.

Dalam menyelesaikan tugas akhir ini, penulis mendapatkan banyak bantuan, dorongan, serta dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Kedua orang tua penulis, Ayah Moch. Machfud dan Ibu Nunung Rosida yang selalu memberikan doa serta dukungannya kepada penulis dalam proses pengerjaan tugas akhir ini
2. Saudara penulis, Rafika Rakhmawati dan Raditya Davi serta keluarga besar atas dukungan dan doa.
3. Bapak Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., M.T., sebagai dosen pembimbing tugas akhir penulis yang telah memberikan banyak waktu dan ilmunya kepada penulis.
4. Ibu Vivien Suphandani, S.T., M.E., Ph.D, Bapak Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D., dan Bapak Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA., sebagai dosen penguji tugas akhir yang telah memberikan saran dan kritik bagi penulis.
5. Bapak Prof. Dr. Ing. Ir. Herman Sasongko sebagai dosen wali penulis yang telah memberikan dukungan dan ilmunya kepada penulis.
6. Senior penulis, Varien, Ursula dan Ayub yang telah banyak membantu penulis dalam proses penulisan tugas akhir.
7. Sahabat dekat penulis, Riza Umami, Tri Adi Yudiantara, Deasy Saraswati, Rozy Aini, Elisa Bidari dan Fidela Atika, yang telah menemani suka duka dan memberi dukungan kepada penulis.
8. Sahabat lama penulis, Caludia Liwianti, Windy Rahmanda dan Agnes Meivy, Leny, Denisca, Erini, Evita, Uce, Diana, Yuni, Heny yang selalu memberi dukungan kepada penulis.

9. Teman dekat penulis, Alfadilah Eka yang telah menemani dan memberi semangat selama penulis menyusun tugas akhir.
10. Teman Indonesian Corrosion Association 2016/2017, yang telah memberi dukungan kepada penulis
11. Teman-teman Laboratorium Mekanika Fluida atas dukungan selama proses pengerjaan tugas akhir ini.
12. Teman-teman 3,5 tahun, Ananda Azaria dan Andrew Tirtawijaya serta angkatan M58 yang memberikan dukungan dan kenangan selama masa perkuliahan.
13. Seluruh civitas academica Departemen Teknik Mesin FTI ITS.

Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih banyak kekurangan, sehingga penulis memohon maaf sebanyak-banyaknya dan bersedia untuk menerima saran dan kritik dari pembaca. Semoga tugas akhir ini dapat memberikan ilmu yang bermanfaat bagi pembaca serta berkontribusi dalam perkembangan ilmu pengetahuan di Departemen Teknik Mesin FTI ITS. Wassalamualaikum warahmatullahi wabarakatuh.

Surabaya, Januari 2019

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN

ABSTRAK.....	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL.....	xv
BAB I PENDAHULUAN	1

1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah.....	4
1.4 Tujuan Penelitian.....	5
1.5 Manfaat Penelitian.....	5

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Aliran Eksternal.....	7
2.1.1 Gradien Tekanan pada Boundary layer Aliran.....	8
2.1.2 Aliran pada Silinder Sirkular.....	9
2.1.3 Gaya Drag pada Silinder Sirkular.....	11
2.1.4 Gaya Aerodinamis Pada Silinder Sirkular.....	12
2.2 Penelitian Terdahulu.....	17
2.2.1 Pengaruh Besar Celah pada Silinder Sirkular Tunggal dengan Dinding	17
2.2.2 Pengaruh Besar Celah pada Dua Silinder Sirkular dengan Dinding	24
2.2.3 Pengaruh Kemiringan Dinding terhadap Aliran pada Backward Facing Step.....	31

BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	35
3.1 Pre-processing.....	35
3.1.1 Pembuatan Domain Simulasi dan Boundary Condition	35
3.1.2 Pembuatan Meshing	36
3.2 Processing	37
3.2.1 Pemodelan Fenomena Fisis	37
3.2.2 Pemilihan Properti Fluida Kerja.....	38
3.2.3 Penginputan nilai pada Boundary Condition	38
3.2.4 Solution Method	38
3.2.5. Monitor.....	39
3.2.6. Solution Initialization.....	39
3.3. Post-processing	39
3.3.1 Grid Independency Test	39
3.4 Persamaan Bilangan tak Berdimensi	40
3.5 Hasil yang akan diperoleh	43
BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN	45
4. 1 Pengaruh variasi G/D terhadap karakteristik aliran tanpa inclined wall angle (α) = 0°	45
4.2. Pengaruh variasi G/D terhadap karakteristik aliran pada inclined wall angle (α) sebesar 10°	55
4.3. Pengaruh variasi G/D terhadap karakteristik aliran pada inclined wall angle (α) sebesar 20°	63
4.4 Pengaruh variasi inclined wall angle (α) terhadap karakteristik aliran pada G/D = 0,2 dan G/D = 1	72
4.5 Diskusi.....	81

BAB V_KESIMPULAN DAN SARAN	89
5.1. Kesimpulan.....	89
5.2 Saran.....	90
DAFTAR PUSTAKA	91
LAMPIRAN	
BIODATA PENULIS	

(Halaman sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Daerah disturbed flow pada silinder sirkular.....	7
Gambar 2.2 Gradien Tekanan pada Boundary Layer dalam Variasi Luas Penampang (Pritchard et al., 2011)	9
Gambar 2.3 Karakteristik aliran pada Silinder Sirkular pada Bilangan Reynolds berbeda (Anderson, 2011).....	10
Gambar 2.4 Variasi koefisien drag silinder dengan Bilangan Reynolds (Pritchard et al., 2011).....	12
Gambar 2. 5 Distribusi tekanan basis pada G/D berbeda (Bearman dan Zdravkovich, 1978).....	17
Gambar 2.6 Distribusi Tekanan pada silinder sirkular dekat dinding dengan	18
Gambar 2.7 Ilustrasi dalam perancangan eksperimen	19
Gambar 2.8 Grafik distribusi tekanan pada permukaan	20
Gambar 2.9 Grafik drag dan lift coefficient pada variasi G/D	20
Gambar 2.10 Bentuk Geometri pada Simulasi Aliran.....	21
Gambar 2.11 Distribusi tekanan pada (a) silinder sirkular, (b) lower wall dan (c) Perbandingan antara CDp dan CLp terhadap variasi G/D pada kemiringan 0° (Ursula, 2018)	22
Gambar 2.12 Distribusi tekanan pada (a) silinder sirkular,	23
Gambar 2.13 Domain simulasi pada penelitian Numerik	24
Gambar 2.14 Distribusi koefisien tekanan pada; (a) silinder-1, ..	26
Gambar 2.15 Hasil koefisien tekanan (a) koefisien drag tekanan (CDp) dan (b) koefisien lift tekanan (CLp) pada silinder sirkular tandem dengan variasi jarak longitudinal (Widodo, 2010)	27
Gambar 2.16 Diagram skematik pada eksperimen.....	27
Gambar 2.17 Distribusi tekanan pada permukaan.....	28
Gambar 2.18 Distribusi tekanan pada permukaan downstream silinder untuk $Re= 5,3 \times 10^4$:	29
Gambar 2.19 Distribusi tekanan pada plat datar untuk	30
Gambar 2.20 Skema alat pada eksperimen.....	31

Gambar 2.21 Panjang reattachment dalam fungsi step angle	31
Gambar 2.22 Profil kecepatan pada $Re=15000$ dengan inclination angle : (a) 90° , (b) 45° , (c) 25° dan (d) 10° (o : data eksperimen, - : data simulasi 3D, ... : data simulasi 2D)	32
Gambar 2.23 Sreamline pada inclination angle (a) 90° ,	34
Gambar 3.1 Domain simulasi dan boundary condition	36
Gambar 3.2 Meshing dari domain simulasi	37
Gambar 3.3 Perbandingan nilai CD_p tiap tingkat kerapatan mesh	39
Gambar 3.4 Skema gaya drag dan lift pada silinder sirkular	43
Gambar 4.1 Grafik C_p silinder-1 terhadap variasi G/D	47
Gambar 4.2 Grafik C_p silinder-2 terhadap variasi G/D	48
Gambar 4.3 Detail posisi reattachment pada $G/D = 0,1$	49
Gambar 4.4 Grafik C_p lower wall terhadap variasi G/D	50
Gambar 4.5 Grafik perbandingan antara CD_p dan CL_p terhadap variasi G/D tanpa kemiringan dinding	52
Gambar 4.6 Fenomena blockage pada $G/D = 0,1$	53
Gambar 4.7 Visualisasi aliran melintasi dua silinder sirkular tiap G/D tanpa kemiringan dinding ($\alpha = 0^\circ$)	54
Gambar 4.8 Grafik C_p silinder-1 terhadap variasi G/D	56
Gambar 4.9 Grafik C_p silinder-2 terhadap variasi G/D	57
Gambar 4.10 Grafik C_p lower wall terhadap variasi G/D	59
Gambar 4.11 Grafik perbandingan antara CD_p dan CL_p terhadap variasi G/D pada inclined wall angle ($\alpha = 10^\circ$)	60
Gambar 4.14 Grafik C_p silinder-1 terhadap variasi G/D	64
Gambar 4.15 Grafik C_p silinder-2 terhadap variasi G/D	66
Gambar 4.16 Grafik C_p lower wall terhadap variasi G/D	67
Gambar 4.17 Grafik perbandingan antara CD_p dan CL_p	69

Gambar 4.18 Visualisasi aliran melintasi dua silinder sirkular tiap G/D pada inclined wall angle (α) = 20°	71
Gambar 4.19 Grafik distribusi C_p Silinder-1 setiap variasi α	73
Gambar 4.20 Grafik distribusi C_p Silinder-1 setiap variasi α	73
Gambar 4.21 Grafik distribusi C_p Silinder-2 setiap variasi α	74
Gambar 4.22 Grafik distribusi C_p Silinder-2 setiap variasi α	74
Gambar 4.23 Grafik distribusi C_p lower wall setiap variasi α	75
Gambar 4.24 Grafik distribusi C_p lower wall setiap variasi α	76
Gambar 4.25 Grafik CD_p dan CL_p Silinder-1 tiap variasi α	77
Gambar 4.26 CD_p dan CL_p Silinder-2 tiap variasi α	78
Gambar 4.27 Visualisasi aliran melintasi dua silinder sirkular tiap variasi α pada $G/D = 0,2$	79
Gambar 4.28 Visualisasi aliran melintasi dua silinder sirkular tiap variasi α pada $G/D = 1$	80
Gambar 4.29 Perbandingan grafik C_p simulasi numerik dengan eksperimen (Triyogi et al., 2010) pada $G/D = 0,2$; (a) Silinder-1, (b) Silinder-2 dan (c) Lower wall tanpa kemiringan dinding	82
Gambar 4.30 Grafik Perbandingan nilai CD_p dan CL_p pada silinder-1 terhadap variasi G/D dan $\alpha = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$	85
Gambar 4. 31 Zoom-in fenomena arus balik aliran di depan silinder-2 pada $G/D = 0,4$ dengan kemiringan dinding ($\alpha = 20^\circ$)	86
Gambar 4. 32 Grafik Perbandingan nilai CD_p dan CL_p pada silinder-2 terhadap variasi G/D dan $\alpha = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$	87

(Halaman sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Recirculation Length (Sumber : Louda et al., 2013) ...	33
Tabel 3.1 Nilai CD_p silinder sirkular 1 pada setiap tipe mesh....	40

(Halaman sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia memiliki potensi sumber daya alam yang besar, salah satunya yaitu minyak bumi dan gas alam. Sumber daya alam perlu diolah menjadi suatu produk agar dapat menunjang kesejahteraan kehidupan masyarakat Indonesia. Perusahaan minyak bumi dan gas alam baik milik Indonesia maupun milik asing didirikan di daratan (Onshore) maupun di lepas pantai (Ofshore) untuk memproduksi dan mengolah minyak bumi dan gas alam. Menurut badan pusat statistik, produksi minyak bumi mentah pada tahun 2016 mencapai 831.058 barel per hari dan gas bumi sebesar 7.398 MMScfd.

Dalam aplikasi engineering, pengolahan sumber daya alam erat kaitannya dengan rekayasa teknik. Analisa struktur merupakan salah satu rekayasa teknik yang berperan untuk menganalisa interaksi antara fluida dengan struktur. Dalam studi mekanika fluida, diketahui bahwa fluida yang mengalir melintasi suatu struktur akan memberikan gaya angkat dan gaya tahan pada struktur tersebut. Sehingga perlu dilakukan analisa antara fluida dengan struktur agar dapat mengurangi peluang kegagalan suatu struktur seperti berkurangnya kekuatan suatu material.

Silinder sirkular yang berinteraksi dengan fluida adalah salah satu bentuk yang umum digunakan pada rekayasa teknik. Salah satu elemen struktural yang berbentuk silinder sirkular yaitu pipa. Instalasi perpipaan yang didirikan berkelompok atau dalam susunan tertentu sering ditemukan dalam bangunan industri. Salah satunya pada instalasi perpipaan di atas tanah untuk mengalirkan minyak dari sumur produksi menuju kilang minyak di daratan (Onshore) untuk diolah. Peletakan instalasi perpipaan di atas tanah pada umumnya diletakkan dengan jarak tertentu dari permukaan tanah baik pada permukaan tanah yang datar atau dengan kemiringan tertentu. Peletakan instalasi perpipaan memberikan

pengaruh yang signifikan terhadap karakteristik aliran udara yang melintasi instalasi perpipaan tersebut. Karakteristik aliran tersebut berupa fenomena aliran yang nantinya akan menimbulkan gaya angkat dan gaya tahan pada instalasi perpipaan.

Pada penelitian-penelitian sebelumnya banyak variasi susunan silinder sirkular yang telah dilakukan yaitu pada silinder sirkular tunggal dekat dinding datar oleh Bearman dan Zdravkovich, (1978) dengan melakukan eksperimen menggunakan wind tunnel. Bilangan Reynolds yang digunakan dalam eksperimen ini adalah $2,5 \times 10^4$ dan $4,8 \times 10^4$ yang didasarkan pada diameter silinder. Variasi eksperimen dilakukan pada besar celah antara silinder sirkular dengan dinding sebesar $G/D = 0$ hingga $G/D = 3,5$. Hasil yang didapatkan dari eksperimen ini menunjukkan bahwa fenomena vortex shedding pada silinder sirkular terjadi dengan bilangan Strouhal yang konstan untuk $G/D \geq 0,3$. Vortex shedding yang terjadi akan teredam apabila silinder sirkular didekatkan dengan dinding ($G/D < 0,3$). Vortex shedding adalah fenomena aliran yang berosilasi sehingga menghasilkan gaya lift yang berfluktuasi pada silinder sirkular. Gaya lift yang berfluktuasi tersebut memberikan beban dinamis pada silinder sirkular, sehingga peluang kegagalan struktur menjadi semakin besar. Hasil selanjutnya yaitu peningkatan G/D akan menghasilkan distribusi tekanan yang lebih simetris. Distribusi tekanan hampir simetris sempurna saat $G/D = 0,4$. Pada G/D yang rendah titik separasi disisi bawah silinder sirkular bergeser menuju trailing edge (sudut 180° pada silinder sirkular) akibat adanya favorable pressure gradien.

Penelitian secara numerik mengenai aliran melintasi dua silinder sirkular disusun tandem dekat dinding datar telah dilakukan oleh Widodo, (2010). Data eksperimen yang digunakan sebagai pembanding dari hasil simulasi adalah data hasil eksperimen Triyogi et al, (2010). Kedua penelitian ini dilakukan pada Bilangan Reynolds $5,3 \times 10^4$. Penelitian secara numerik untuk susunan tandem dengan variasi rasio jarak longitudinal kedua

silinder (L/D) dari 1,5; 2; 3; 4; 5; 6. Rasio besar celah silinder sirkular ke dinding dijaga konstan yaitu pada $G/D = 0,2$. Sedangkan penelitian dengan eksperimen dilakukan pada L/D konstan yaitu 1,5 dengan variasi G/D mulai 0 hingga 0,467. Hasil yang didapat dari simulasi numerik yaitu bahwa variasi (L/D) yang semakin meningkat memberikan pengaruh berkurangnya interaksi antara ke dua silinder sirkular, namun keberadaan dinding tetap memberikan pola aliran masing-masing pada silinder sirkular. Akibat adanya dinding berpengaruh pada pressure recovery pada dinding hingga $x/D > 12$. Adanya silinder-1 dengan $L/D < 4$ akan mengurangi koefisien drag akibat tekanan pada silinder-2 karena free shear layer silinder-1 melingkupi silinder-2. Dengan hasil yang sama dari eksperimen didapat bahwa distribusi tekanan kedua silinder sirkular sangat dipengaruhi oleh keberadaan dinding datar.

Penelitian mengenai kemiringan dinding diteliti secara numerik oleh Louda et al, (2013) dalam 2 dimensi dan 3 dimensi aliran turbulen inkompresibel pada backward facing inclined step dengan variasi sudut sebesar 10° , 25° , 45° dan 90° . Hasil simulasi numerik tersebut dibandingkan dengan penelitian secara eksperimen oleh Ruck dan Makiola, (1993). Hasil kedua penelitian tersebut yaitu pada kemiringan step yang semakin besar akan menghasilkan panjang reattachment yang semakin besar sehingga terbentuk recirculation zone yang juga semakin besar.

1.2 Rumusan Masalah

Interaksi aliran yang melintasi dua silinder sirkular disusun tandem dekat dinding memberikan informasi pengaruh blockage (hambatan pada sisi celah) antara sisi kedua silinder sirkular bagian bawah dengan dinding, serta momentum aliran yang cenderung menghindari celah sempit sehingga aliran terdefleksi pada sisi atas kedua silinder sirkular. Kecenderungan aliran ini menyebabkan perbedaan distribusi tekanan antara sisi bawah dengan sisi atas kedua silinder sirkular sehingga akan menimbulkan gaya lift dan gaya drag. Distribusi tekanan akan lebih simetris dengan semakin

meningkatnya rasio gap (G/D). Dua silinder sirkular yang diletakkan pada permukaan miring akan mempengaruhi pola aliran yang melintasi kedua silinder sirkular. Peningkatan sudut kemiringan akan meningkatkan besar reattachment dimana berhubungan dengan besarnya daerah resirkulasi pada kemiringan tersebut. Apabila dua silinder sirkular diletakkan pada dinding miring yang merupakan daerah resirkulasi, maka kedua silinder sirkular akan menerima gaya dari berbagai arah sehingga distribusi tekanan yang dihasilkan akan berbeda dari dua silinder sirkular yang diletakkan pada dinding datar.

Berdasarkan hasil penelitian-penelitian tersebut, maka permasalahan pada penelitian ini adalah analisis karakteristik aliran yang melintasi dua silinder sirkular yang tersusun tandem dekat dinding miring menggunakan simulasi numerik. Variasi yang dilakukan adalah rasio besar celah dinding dengan silinder sirkular terhadap diameter (G/D) = 0,1, 0,2, 0,3, 0,4, 0,5, 1 dan variasi kemiringan dinding pada sudut 0° , 10° , dan 20° . Rasio jarak longitudinal antar dua silinder sirkular terhadap diameter (L/D) = 1,5 dibuat konstan. Selain karakteristik aliran, permasalahan dari tugas akhir ini adalah bagaimana distribusi dari koefisien tekanan (C_p) kedua silinder sirkular dan dinding, selanjutnya bagaimana nilai koefisien pressure drag (CD_p) dan koefisien pressure lift (CL_p) pada kedua silinder sirkular yang tersusun tandem dekat dinding miring.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada tugas akhir ini adalah:

1. Fluida kerja adalah udara dengan temperature 300 K pada tekanan atmosfer
2. Aliran fluida adalah steady dan incompressible flow
3. Aliran fluida memasuki domain simulasi pada inlet secara uniform
4. Bilangan Reynolds yang digunakan pada simulasi adalah 5×10^4

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan umum pada tugas akhir ini adalah menganalisis karakteristik aliran yang melintasi dua silinder sirkular yang tersusun tandem dekat dinding miring dengan simulasi numerik. Variasi yang dilakukan pada tugas akhir ini adalah rasio jarak dinding dengan silinder sirkular terhadap diameter (G/D) = 0,1, 0,2, 0,3, 0,4, 0,5, 1 dan variasi kemiringan dinding pada sudut 0° , 10° , dan 20° . Rasio jarak longitudinal antar dua silinder sirkular terhadap diameter (L/D) = 1,5 dibuat konstan.

Sedangkan tujuan khusus dari simulasi numerik yaitu untuk menganalisis data kuantitatif dan kualitatif sebagai berikut:

1. Menganalisis pengaruh besar celah dan kemiringan dinding terhadap karakteristik aliran secara kuantitatif, yaitu dengan memperoleh data koefisien distribusi tekanan (C_p) pada kedua silinder sirkular dan dinding, serta nilai koefisien pressure drag (CD_p) dan koefisien pressure lift (CL_p) pada kedua silinder sirkular.
2. Menganalisis pengaruh besar celah dan kemiringan dinding terhadap karakteristik aliran secara kualitatif, yaitu dengan mengamati visualisasi aliran berupa kontur kecepatan, kontur tekanan dan streamline dari aliran yang melintasi dua silinder sirkular yang disusun tandem dekat dinding miring.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian dari tugas akhir ini adalah:

1. Memberikan pengetahuan secara kuantitatif dan kualitatif mengenai pengaruh kemiringan dinding terhadap karakteristik aliran fluida yang melintasi dua silinder sirkular yang disusun tandem dekat dinding miring.
2. Memberikan pengetahuan mengenai pengaruh rasio G/D terhadap karakteristik aliran fluida yang melintasi dua

silinder sirkular yang disusun tandem dekat dinding miring.

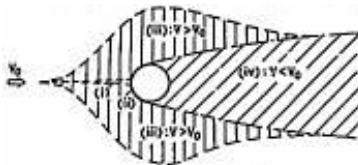
3. Memberikan pengetahuan dalam penggunaan simulasi software CFD untuk analisis aliran fluida yang melintasi dua silinder sirkular yang disusun tandem dekat dinding miring

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Beberapa referensi yang relevan dibutuhkan untuk menunjang pelaksanaan tugas akhir ini. Referensi tersebut mengenai fenomena aliran pada silinder sirkular tunggal, gaya-gaya aerodynamic yang bekerja pada silinder sirkular, serta penelitian-penelitian terdahulu yang berkaitan dengan pengaruh peletakan sebuah silinder sirkular dekat dinding, pengaruh peletakan dua silinder sirkular yang tersusun tandem di dekat dinding datar, dan pengaruh kemiringan dinding terhadap aliran.

2.1 Aliran Eksternal

Aliran eksternal adalah aliran dimana fluida melingkupi suatu benda padat (Pritchard, 2011). Ketika aliran melintasi benda padat akan terbentuk daerah disturbed flow disekitar benda padat sesuai dengan geometri kontur body, orientasi dan ukuran dari benda padat tersebut. Daerah disturbed flow pada silinder sirkular ditunjukkan pada Gambar 2.1. Daerah (i) merupakan daerah dimana kecepatan melambat sampai kecepatan mencapai nol pada titik stagnasi, selanjutnya pada daerah (ii) merupakan daerah mulai terbentuknya boundary layer dengan thickness tertentu akibat gesekan. Daerah (iii) merupakan daerah sampling dimana tekanan minimum karena kecepatan pada daerah ini lebih besar dari kecepatan masuk dan daerah (iv) merupakan daerah wake yang dibentuk dari separasi aliran yang memiliki tekanan dan kecepatan sangat rendah.



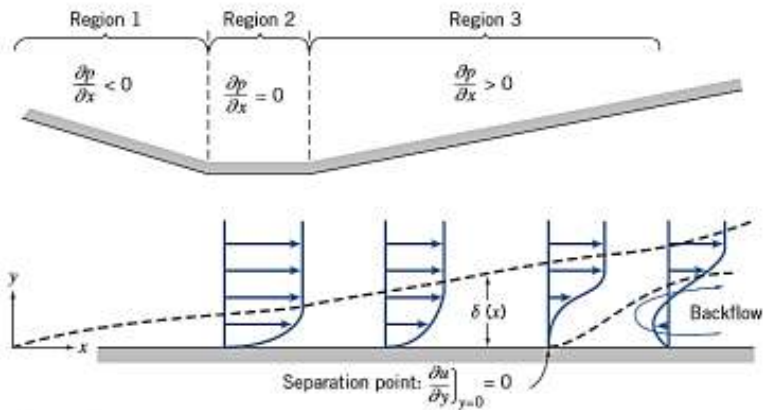
Gambar 2.1 Daerah disturbed flow pada silinder sirkular
(Zdravkovich, 1997)

Separasi aliran yang parah dan unsteady umumnya dihasilkan oleh bluff-body (Zdravkovich, 1997). Bluff body adalah benda yang tidak diberikan streamlining. Salah satu contoh bluff-body adalah silinder sirkular yang akan dibahas pada sub-bab berikut.

2.1.1 Gradien Tekanan pada Boundary layer Aliran

Ketika fluida mengalir melalui suatu permukaan benda padat maka kecepatan fluida akan dihambat oleh tegangan geser di permukaan benda. Hal tersebut terjadi karena tegangan geser diimbangi oleh berkurangnya momentum aliran sehingga profil kecepatan terus berubah dan tebal boundary layer akan semakin besar. Hal ini juga dapat mempengaruhi gradien tekanan yang dialami aliran fluida seperti pada Gambar 2.2. Gradien tekanan dapat dibagi dalam tiga region, yaitu zero pressure gradient, favorable pressure gradient, dan adverse pressure gradient.

Aliran fluida dapat dikatakan mengalami favorable pressure gradient, jika tekanan aliran fluida mengalami penurunan searah dengan aliran fluida mengalir ($\partial p / \partial x < 0$). Penurunan tekanan fluida kerja menyebabkan peningkatan kecepatan fluida. Aliran fluida kerja dapat dikatakan mengalami zero pressure gradient ($\partial p / \partial x = 0$), jika aliran fluida tidak mengalami perubahan tekanan dan separasi aliran. Selanjutnya aliran fluida kerja dapat dikatakan mengalami adverse pressure gradient, jika tekanan aliran fluida mengalami peningkatan ($\partial p / \partial x > 0$). Peningkatan tekanan fluida kerja menyebabkan penurunan kecepatan. Hal ini disebabkan oleh adanya tegangan geser pada permukaan (wall) sehingga aliran yang mendekati wall akan berhenti ($\partial u / \partial y = 0$) atau terjadi separasi. Separasi terjadi bila momentum yang digunakan untuk menggerakkan fluida tidak mampu melawan adverse pressure gradien dan tegangan geser yang terjadi yang selanjutnya akan terbentuk wake.



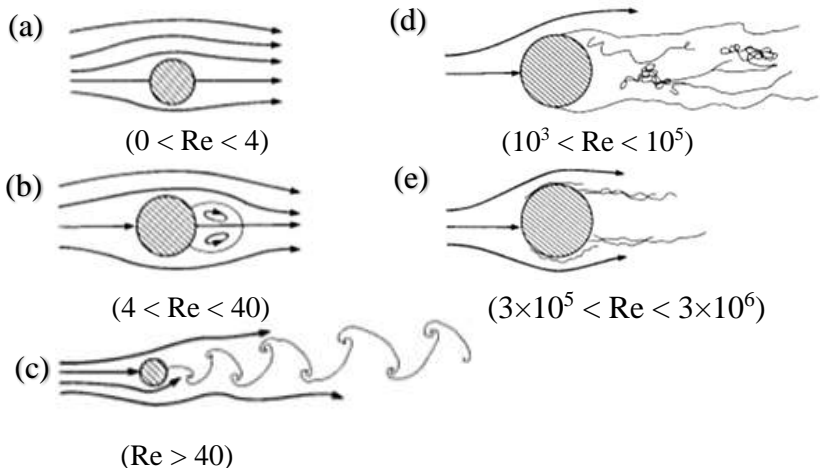
Gambar 2.2 Gradien Tekanan pada Boundary Layer dalam Variasi Luas Penampang (Pritchard et al., 2011)

2.1.2 Aliran pada Silinder Sirkular

Aliran pada silinder sirkular sangat dipengaruhi oleh Bilangan Reynolds. Peristiwa transisi dan separasi yang terjadi pada aliran dapat diketahui karakteristiknya melalui Bilangan Reynolds. Apabila aliran yang melintasi silinder sirkular tidak mengalami transisi, dengan kata lain Bilangan Reynolds berada pada nilai yang tetap, maka dapat terlihat perbedaan titik separasi yang terjadi. Aliran turbulen memiliki titik separasi yang tertunda akibat aliran memiliki momentum yang lebih besar sehingga lebih mampu mengatasi adverse pressure gradient yang menghambat aliran. Sehingga dengan adanya peningkatan Bilangan Reynolds aliran yang melintasi silinder sirkular akan memperkecil daerah wake yang terbentuk karena separasi, dan menurunkan pressure drag pada sisi downstream silinder sirkular.

Beberapa fenomena yang lebih rinci seperti pada gambar 2.3 terjadi saat Bilangan Reynolds pada aliran yang melintasi silinder sirkular tunggal divariasikan. Pada Bilangan Reynolds yang sangat rendah ($0 < Re < 4$), silinder sirkular memiliki

streamline yang hampir simetris dan aliran yang melekat pada silinder sirkular seperti pada Gambar 2.3(a). Rentang Bilangan Reynolds ini disebut dengan aliran Stokes dimana gaya tekan dan gaya gesek aliran mendekati kondisi setimbang pada aliran Stokes. Kesetimbangan gaya ini disebabkan oleh kecepatan aliran yang sangat rendah sehingga pengaruh inersia pada aliran juga rendah, pada rentang ini separasi tidak terjadi. Separasi aliran pada belakang silinder sirkular mulai timbul apabila Bilangan Reynolds ditingkatkan pada rentang ($4 < Re < 40$). Separasi ini menghasilkan dua vortex yang stabil pada sisi belakang silinder diperlihatkan pada Gambar 2.3 (b). Vortex yang terbentuk berubah menjadi tidak stabil saat Bilangan Reynolds ditingkatkan menuju ($Re > 40$). Ketidakstabilan vortex pada aliran menghasilkan vortex shedding beraturan pada downstream seperti pada Gambar 2.3(c). Vortex shedding yang terjadi pada downstream umumnya disebut sebagai Karman vortex street.



Gambar 2.3 Karakteristik aliran pada Silinder Sirkular pada Bilangan Reynolds berbeda (Anderson, 2011)

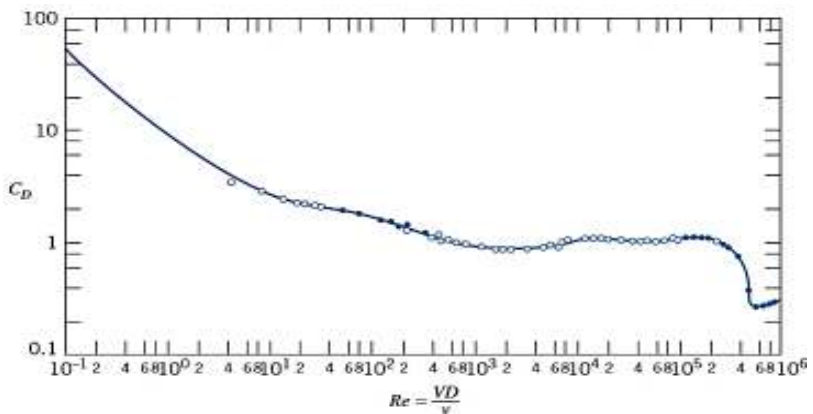
Peningkatan Bilangan Reynolds pada rentang ($10^3 < Re < 10^5$) menyebabkan Karman vortex street menjadi turbulen dan berubah menjadi wake yang memiliki bentuk berbeda. Separasi boundary layer laminar mulai terjadi pada rentang Bilangan Reynolds ini yaitu terjadi pada titik sekitar 80° dari titik stagnasi seperti terlihat pada Gambar 2.3(d). Pada rentang Bilangan Reynolds yang lebih tinggi ($3 \times 10^5 < Re < 3 \times 10^6$) free shear layer yang terdapat diatas daerah terseparasi mengalami transisi menuju aliran turbulen. Dapat dilihat pada Gambar 2.3(e) aliran ini akan melekat kembali pada belakang silinder, namun terseparasi kembali pada titik 120° dari titik stagnasi (Anderson, 2011).

2.1.3 Gaya Drag pada Silinder Sirkular

Gaya drag yang muncul pada aliran yang melintasi silinder sirkular terdiri dari dua jenis, yaitu gaya drag akibat tekanan dan gaya drag akibat gesekan. Kedua jenis gaya drag ini merupakan komponen-komponen gaya yang menyusun gaya drag total pada silinder sirkular. Silinder sirkular merupakan bluff body dimana gaya drag yang muncul disebabkan oleh tekanan. Sedangkan Streamlined body gaya drag yang muncul disebabkan oleh gesekan (Anderson, 2011).

Koefisien drag adalah fungsi dari Bilangan Reynolds. Gambar 2.4 menunjukkan variasi koefisien drag silinder dengan Bilangan Reynolds. Pada Bilangan Reynolds yang sangat rendah ($Re \leq 1$), aliran tidak mengalami separasi dan menghasilkan wake yang laminar. Gaya drag yang bekerja pada Bilangan Reynolds tersebut didominasi oleh gaya drag gesekan. Peningkatan Bilangan Reynolds menghasilkan penurunan koefisien drag hingga $Re \approx 1.000$. Pada Bilangan Reynolds tersebut mulai timbul daerah wake turbulen yang berkembang seiring dengan pergeseran titik separasi dari sisi belakang menuju sisi depan silinder sirkular. Daerah wake yang timbul ini memiliki tekanan yang relatif rendah sehingga menghasilkan gaya drag tekanan yang besar. Saat $Re \approx 1.000$, 95% gaya drag total disebabkan oleh gaya drag tekanan.

Pada rentang Bilangan Reynolds ($10^3 < Re < 3 \times 10^5$), koefisien drag pada silinder mendekati konstan. Pada rentang Bilangan Reynolds tersebut sisi belakang silinder sirkular didominasi oleh daerah wake turbulen bertekanan rendah, sehingga gaya drag total yang terjadi merupakan akibat dari perbedaan tekanan antara sisi depan dan belakang. Untuk Bilangan Reynolds ($Re > 3 \times 10^5$), transisi mulai terjadi dan boundary layer pada sisi depan silinder sirkular menjadi turbulen. Transisi boundary layer menyebabkan pergeseran titik separasi dari bagian tengah silinder sirkular menuju sisi downstream. Pergeseran titik separasi menyebabkan penyusutan daerah wake, sehingga perbedaan tekanan antara sisi depan dan belakang berkurang yang menyebabkan penurunan koefisien drag secara drastis (Pritchard, 2011).

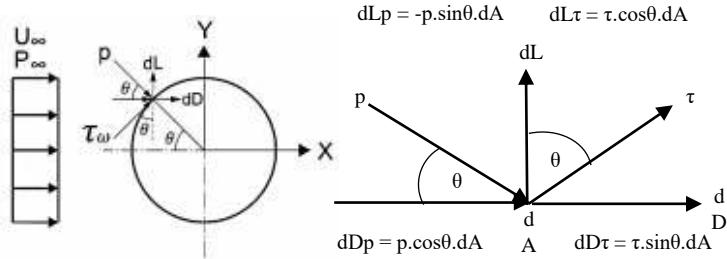


Gambar 2.4 Variasi koefisien drag silinder dengan Bilangan Reynolds (Pritchard et al., 2011)

2.1.4 Gaya Aerodinamis Pada Silinder Sirkular

Aliran dengan kecepatan (U_∞) yang melintasi suatu struktur yang berbentuk bluff body (dalam simulasi ini berupa silinder sirkular) akan menimbulkan interaksi antara fluida dengan

silinder sirkular. Interaksi tersebut memberikan pengaruh pada karakteristik aliran berupa fenomena fisis yang nantinya akan membentuk gaya aerodinamis yaitu gaya drag dan gaya lift. Gaya drag dan gaya lift tersusun dari gaya drag dan gaya lift akibat tekanan dan akibat gesekan. Secara matematis dimodelkan sebagai berikut:



Dimana dA merupakan suatu elemen di titik A pada permukaan silinder sirkular, dD merupakan elemen gaya drag dan dL merupakan elemen gaya lift. Sedangkan p merupakan selisih tekanan pada titik dA dengan tekanan statis pada free stream.

$$\text{Koefisien Tekanan } C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2} \quad (2.1)$$

$$\text{Koefisien Gesekan } C_f = \frac{\tau \omega}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2} \quad (2.2)$$

$$\text{Gaya Drag total } F_D = C_{Dp} \cdot \frac{1}{2} \rho V^2 A + C_{Df} \cdot \frac{1}{2} \rho V^2 A \quad (2.3)$$

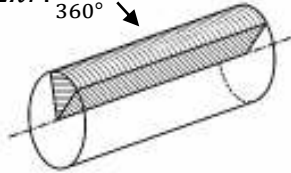
$$\text{Gaya Lift total } F_L = C_{Lp} \cdot \frac{1}{2} \rho V^2 A + C_{Lf} \cdot \frac{1}{2} \rho V^2 A \quad (2.4)$$

Pemodelan koefisien drag akibat tekanan dan akibat gesekan dijabarkan sebagai berikut :

$$F_D = \int dDp + \int dD\tau = \int_{0^\circ}^{360^\circ} (p - p_\infty) \cos \theta \cdot dA + \int_{0^\circ}^{360^\circ} \tau \sin \theta \cdot dA$$

Luasan dA merupakan luas keliling lingkaran sebesar θ terhadap sudut 360°

$$dA = 2\pi r \cdot \frac{\theta}{360^\circ}$$



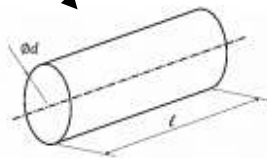
$$C_{Dp} \cdot \frac{1}{2} \rho V^2 A + C_{Df} \cdot \frac{1}{2} \rho V^2 A = \int_0^{360^\circ} (p - p_\infty) \cos \theta \cdot d(2\pi r \frac{\theta}{360^\circ}) + \int_0^{360^\circ} \tau \sin \theta \cdot d(2\pi r \frac{\theta}{360^\circ})$$

$$C_{Dp} + C_{Df} = \frac{2\pi r}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \cdot \frac{1}{360^\circ} \int_0^{360^\circ} (p - p_\infty) \cos \theta \cdot d\theta + \frac{2\pi r}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \cdot \frac{1}{360^\circ} \int_0^{360^\circ} \tau \sin \theta \cdot d\theta$$

$$C_{Dp} + C_{Df} = \frac{2\pi r}{A} \cdot \frac{1}{360^\circ} \int_0^{360^\circ} \frac{(p - p_\infty)}{\frac{1}{2} \rho V^2} \cos \theta \cdot d\theta + \frac{2\pi r}{A} \cdot \frac{1}{360^\circ} \int_0^{360^\circ} \frac{\tau}{\frac{1}{2} \rho V^2} \sin \theta \cdot d\theta$$

Dimana A merupakan luas frontal, karena dalam 2 dimensi maka,

$$A = d \cdot l$$



$$C_{Dp} + C_{Df} = \frac{2\pi r}{2r} \cdot \frac{1}{360^\circ} \int_{0^\circ}^{360^\circ} \frac{(p - p_\infty)}{\frac{1}{2} \rho V^2} \cos \theta \cdot d\theta$$

$$+ \frac{2\pi r}{2r} \cdot \frac{1}{360^\circ} \int_{0^\circ}^{360^\circ} \frac{\tau}{\frac{1}{2} \rho V^2} \sin \theta \cdot d\theta$$

$$C_{Dp} + C_{Df} = \frac{2\pi r}{2r} \cdot \frac{1}{360^\circ} \int_{0^\circ}^{360^\circ} C_p \cdot \cos \theta \cdot d\theta$$

$$+ \frac{2\pi r}{2r} \cdot \frac{1}{360^\circ} \int_{0^\circ}^{360^\circ} C_f \cdot \sin \theta \cdot d\theta$$

Diketahui bahwa $2\pi = 360^\circ$

$$C_{Dp} + C_{Df} = \frac{\pi}{2\pi} \int_0^{2\pi} C_p \cdot \cos \theta \cdot d\theta + \frac{\pi}{2\pi} \int_0^{2\pi} C_f \cdot \sin \theta \cdot d\theta$$

$$C_{Dp} + C_{Df} = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} C_p \cdot \cos \theta \cdot d\theta + \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} C_f \cdot \sin \theta \cdot d\theta \quad (2.5)$$

Pemodelan koefisien lift akibat tekanan dan akibat gesekan dijabarkan sebagai berikut:

$$F_L = \int dL_p + \int dL_\tau =$$

$$- \int_{0^\circ}^{360^\circ} (p - p_\infty) \sin \theta \cdot dA + \int_{0^\circ}^{360^\circ} \tau \cos \theta \cdot dA$$

$$C_{Lp} \cdot \frac{1}{2} \rho V^2 A + C_{Lf} \cdot \frac{1}{2} \rho V^2 A = - \int_{0^\circ}^{360^\circ} (p -$$

$$p_\infty) \sin \theta \cdot d\left(2\pi r \frac{\theta}{360}\right) + \int_{0^\circ}^{360^\circ} \tau \cos \theta \cdot d\left(2\pi r \frac{\theta}{360}\right)$$

$$C_{Lp} + C_{Lf} = -\frac{2\pi r}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \cdot \frac{1}{360^\circ} \int_{0^\circ}^{360^\circ} (p - p_\infty) \sin \theta \cdot d\theta \\ + \frac{2\pi r}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \cdot \frac{1}{360^\circ} \int_{0^\circ}^{360^\circ} \tau \cos \theta \cdot d\theta$$

$$C_{Lp} + C_{Lf} = -\frac{2\pi r}{A} \cdot \frac{1}{360^\circ} \int_{0^\circ}^{360^\circ} \frac{(p - p_\infty)}{\frac{1}{2}\rho V^2} \sin \theta \cdot d\theta \\ + \frac{2\pi r}{A} \cdot \frac{1}{360^\circ} \int_{0^\circ}^{360^\circ} \frac{\tau}{\frac{1}{2}\rho V^2} \cos \theta \cdot d\theta$$

$$C_{Lp} + C_{Lf} = -\frac{2\pi r}{2r} \cdot \frac{1}{360^\circ} \int_{0^\circ}^{360^\circ} \frac{(p - p_\infty)}{\frac{1}{2}\rho V^2} \sin \theta \cdot d\theta \\ + \frac{2\pi r}{2r} \cdot \frac{1}{360^\circ} \int_{0^\circ}^{360^\circ} \frac{\tau}{\frac{1}{2}\rho V^2} \cos \theta \cdot d\theta$$

$$C_{Lp} + C_{Lf} = -\frac{2\pi r}{2r} \cdot \frac{1}{360^\circ} \int_{0^\circ}^{360^\circ} C_p \cdot \sin \theta \cdot d\theta \\ + \frac{2\pi r}{2r} \cdot \frac{1}{360^\circ} \int_{0^\circ}^{360^\circ} C_f \cdot \cos \theta \cdot d\theta$$

$$C_{Lp} + C_{Lf} = -\frac{\pi}{2\pi} \int_0^{2\pi} C_p \cdot \sin \theta \cdot d\theta + \frac{\pi}{2\pi} \int_0^{2\pi} C_f \cdot \cos \theta \cdot d\theta$$

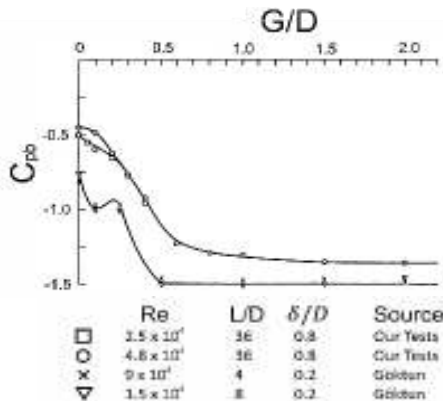
$$C_{Lp} + C_{Lf} = -\frac{1}{2} \int_0^{2\pi} C_p \cdot \sin \theta \cdot d\theta + \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} C_f \cdot \cos \theta \cdot d\theta \quad (2.6)$$

2.2 Penelitian Terdahulu

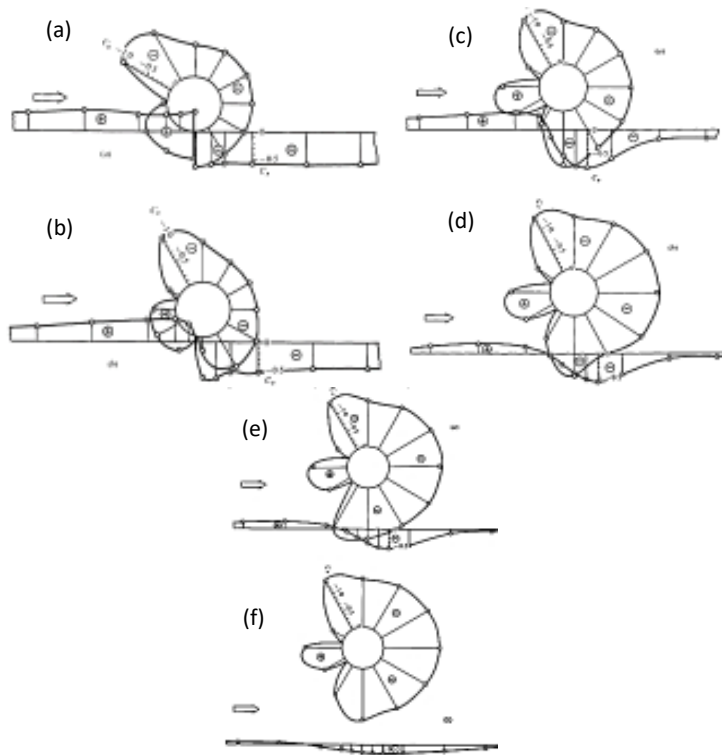
2.2.1 Pengaruh Besar Celah pada Silinder Sirkular Tunggal dengan Dinding

Beberapa faktor yang mempengaruhi aliran pada silinder sirkular dekat dinding adalah Bilangan Reynolds, rasio celah antara silinder sirkular dengan dinding (G/D), dan boundary layer dari dinding. Bearman dan Zdravkovich, (1978) melakukan eksperimen pada wind tunnel untuk mempelajari pengaruh G/D terhadap aliran pada silinder sirkular dekat dinding. Eksperimen dilakukan dengan intensitas turbulensi kurang dari 0.2% pada kecepatan 38 m/s. Sebuah silinder sirkular berdiameter 1,9 cm diletakkan pada lokasi $36D$ yang diukur dari leading edge dinding. Eksperimen tersebut dilakukan pada Bilangan Reynolds $4,8 \times 10^4$.

Hasil eksperimen Bearman dan Zdravkovich, (1978) menunjukkan bahwa terjadi vortex shedding dengan bilangan Strouhal yang konstan pada $G/D > 0,3$. Distribusi tekanan silinder sirkular yang ditunjukkan pada Gambar 2.6 berubah menjadi hampir simetris terhadap titik stagnasi saat $G/D \geq 0,4$. Distribusi tekanan menunjukkan pada daerah upstream memiliki nilai C_p positif dan pada daerah downstream memiliki nilai C_p negatif.



Gambar 2. 5 Distribusi tekanan basis pada G/D berbeda (Bearman dan Zdravkovich, 1978)



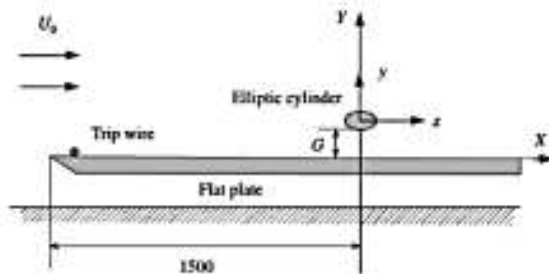
Gambar 2.6 Distribusi Tekanan pada silinder sirkular dekat dinding dengan

(a) G/D 0,0 (b) 0,1 (c) 0,4 (d) 0,8 (e) 1,0 dan (f) 2,0
(Bearman dan Zdravkovich, 1978)

Koefisien tekanan basis (C_{pb}) diukur pada trailing edge downstream silinder dimana nilai koefisien tekanan basis menurun seiring dengan peningkatan G/D . Variasi C_{pb} dengan rasio gap dapat dilihat pada Gambar 2.5. Vortex shedding pada silinder akan teredam pada $G/D < 0,3$. Peredaman vortex shedding akan

menimbulkan daerah wake di dinding pada sisi upstream dan downstream dari silinder sirkular akibat separasi. Titik separasi di sisi bawah silinder sirkular bergeser menuju downstream. Tertundanya separasi ini disebabkan oleh gradien tekanan favorable yang disebabkan oleh aliran yang mengalir melalui celah. Daerah wake akan mendekati dan melekat pada silinder sirkular pada $G/D = 0$.

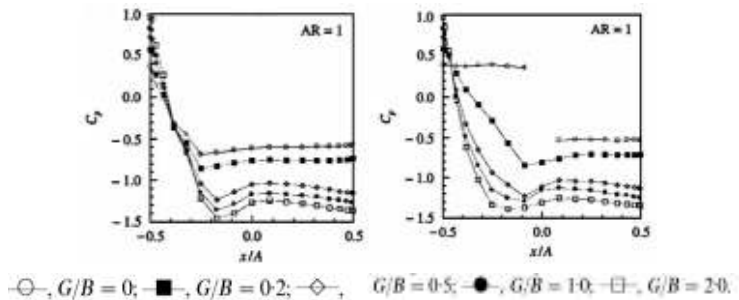
Penelitian secara eksperimental yang lain dilakukan oleh Choi dan Lee, (2000) dalam wind tunnel dengan silinder sirkular berdiameter 21,2 mm dan 28,3 mm dilakukan pada Bilangan Reynolds $1,4 \times 10^4$. Intensitas turbulensi pada wind tunnel diketahui kurang dari 0,08% untuk kecepatan aliran 10 m/s. Ilustrasi dari eksperimen Choi dan Lee dapat dilihat pada Gambar 2.7. Pengukuran tekanan pada silinder sirkular dan pada dinding dilakukan dengan memberikan lubang tap dengan diameter 0,8 mm.



Gambar 2.7 Ilustrasi dalam perancangan eksperimen
(Choi dan Lee, 2000)

Hasil eksperimen Choi dan Lee, (2000) memiliki persamaan dengan eksperimen Bearman dan Zdravkovich, (1978). Choi dan Lee, (2000) menemukan bahwa G/D kritis terjadi pada $G/D = 0.3$ dengan perbedaan ketebalan boundary layer dari Bearman dan Zdravkovich, (1978). Hal ini menunjukkan bahwa ketebalan boundary layer tidak mempengaruhi rasio kritis.

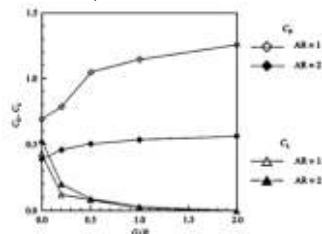
Hasil dari penelitian Choi dan Lee, (2000) berupa pressure coefficient, drag coefficient dan lift coefficient. Pressure coefficient pada silinder sirkular memiliki penurunan yang besar pada $G/D = 0,2$ dan $G/D = 0,5$. Penurunan signifikan tersebut diindikasikan disebabkan oleh rasio kritis. Silinder sirkular memiliki nilai C_p yang menurun ketika G/D dinaikan seperti terlihat pada Gambar 2.8. Nilai drag coefficient silinder sirkular meningkat ketika G/D ditingkatkan. Sedangkan lift coefficient positif terjadi apabila silinder sirkular diletakkan menempel dengan dinding ($G/D = 0$). Lift coefficient ini akan menurun apabila G/D ditingkatkan akibat simetri distribusi tekanan. Nilai drag dan lift coefficient digambarkan pada grafik 2.9.



(a) Upper side

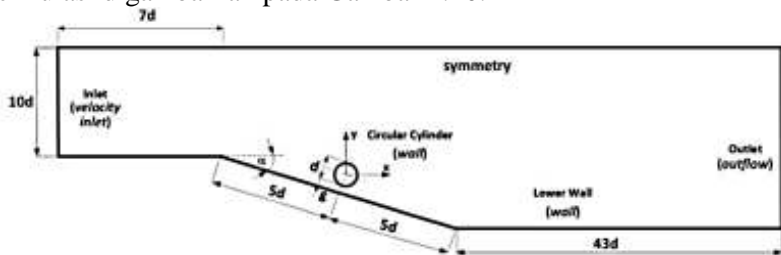
(b) Lower side

Gambar 2.8 Grafik distribusi tekanan pada permukaan silinder sirkular (Choi dan Lee, 2000)



Gambar 2.9 Grafik drag dan lift coefficient pada variasi G/D (Choi dan Lee, 2000)

Penelitian secara numerik dilakukan oleh Ursula, (2018) mengenai karakteristik aliran melintasi silinder sirkular tunggal dekat dinding miring. Simulasi numerik dilakukan pada Bilangan Reynolds 5×10^4 . Jarak antara silinder sirkular ke dinding (G/D) divariasikan pada celah gap 0,1 sampai 0,5. Variasi sudut kemiringan dinding yaitu $0^\circ, 10^\circ$ dan 20° . Domain aliran pada simulasi digambarkan pada Gambar 2.10.



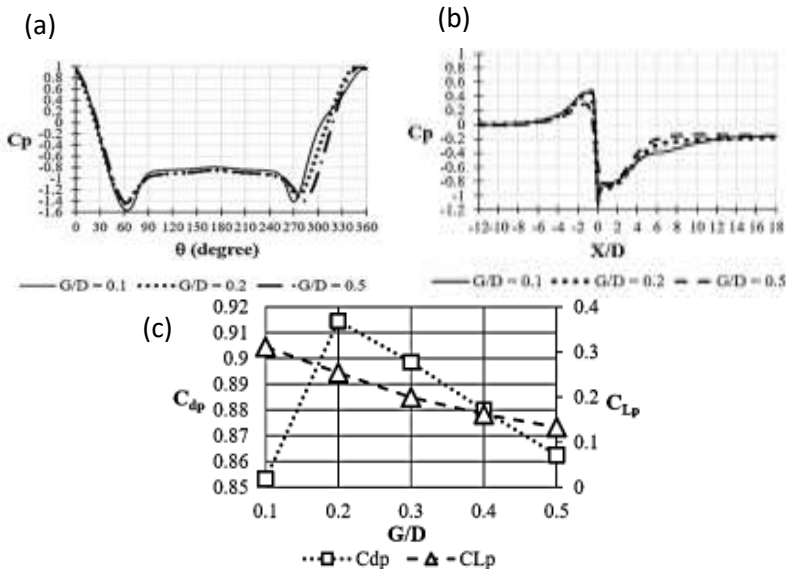
Gambar 2.10 Bentuk Geometri pada Simulasi Aliran
(Ursula, 2018)

Hasil yang didapatkan pada variasi G/D dengan kemiringan 0° yaitu distribusi tekanan (C_p) pada upper side silinder sirkular $G/D = 0,1$ distribusi tekanan mengalami penurunan paling besar. Pada sisi lower side silinder $G/D = 0,1$ terlihat penurunan C_p pada sudut $330^\circ < \theta < 335^\circ$ tidak teratur mengindikasikan adanya pengaruh blockage pada daerah tersebut. Seiring meningkatnya gap (G/D), hambatan (blockage) pada sisi celah akan berkurang sehingga akselerasi aliran pada sisi lower side silinder juga berkurang akibatnya distribusi tekanan C_p akan menunjukkan distribusi yang simetris antara upper side dan lower side silinder sirkular. Distribusi tekanan C_p pada silinder sirkular ditunjukkan pada Gambar 2.11 (a).

Distribusi tekanan pada lower wall digambarkan seperti pada Gambar 2.11 (b). Pada daerah $-4 < X/D < -0,5$ terdapat puncak (peak) mengindikasikan distribusi tekanan naik disebabkan adanya fenomena blockage. Semakin besar G/D , semakin kecil peak yang

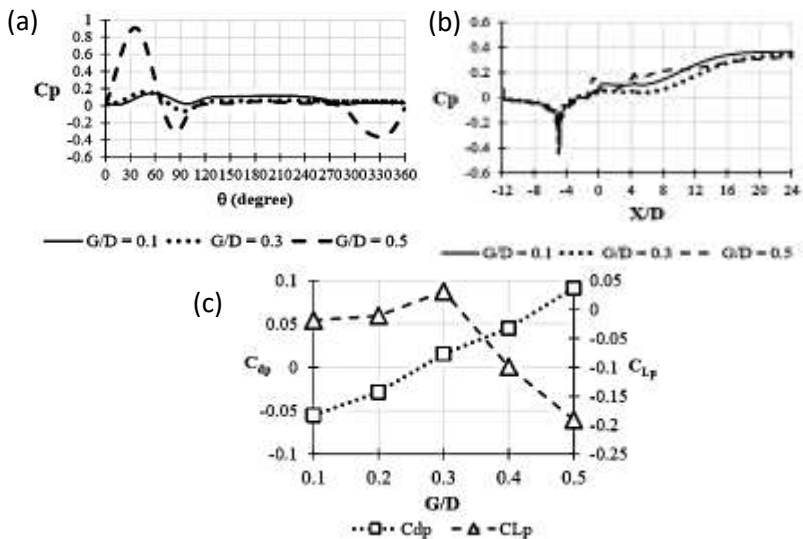
terbentuk. Penurunan tekanan pada lower wall yang signifikan terjadi pada daerah $-1 < X/D < 0,5$ mengindikasikan akselerasi yang tinggi pada sisi lower side silinder sirkular. Tekanan mengalami proses recovery pada daerah setelah $X/D > 10$, tekanan pada lower wall menuju stabil atau konstan. Semakin besar G/D , semakin cepat tekanan mengalami recovery.

Perbandingan C_{Dp} dan C_{Lp} terhadap variasi G/D ditunjukkan seperti pada Gambar 2.11 (c). C_{Dp} cenderung menurun ketika G/D meningkat karena pada G/D yang semakin besar tidak ada pengaruh blockage sehingga perbedaan tekanan sisi depan dan belakang silinder sirkular semakin kecil. Sedangkan, Nilai C_{Lp} semakin kecil pada variasi G/D semakin besar karena perbedaan tekanan pada upper side dan lower side silinder sirkular kecil.



Gambar 2.11 Distribusi tekanan pada (a) silinder sirkular, (b) lower wall dan (c) Perbandingan antara C_{Dp} dan C_{Lp} terhadap variasi G/D pada kemiringan 0° (Ursula, 2018)

Distribusi tekanan (C_p) pada silinder sirkular dengan kemiringan 20° ditunjukkan pada Gambar 2.12 (a). Pada $G/D = 0,1$ hingga $0,3$ fluktuatif nilai C_p kecil hingga mendekati garis lurus. Semakin besar G/D yang diteliti, semakin besar fluktuatif grafik distribusi C_p . Hal ini menjelaskan bahwa semakin besar G/D divariasikan, pengaruh keberadaan lower wall semakin kecil. Pada lower side silinder sirkular nilai minimum C_p wall silinder semakin kecil seiring dengan G/D yang semakin besar. Tekanan silinder sirkular dipengaruhi oleh adanya arus balik aliran pada recirculation zone. Distribusi tekanan pada lower wall digambarkan seperti pada Gambar 2.12 (b). Pada daerah $-2 < X/D < -0,5$ dengan $G/D = 0,5$ peak terbentuk dilihat dari grafik C_p yang meningkat dan menurun sesaat mengindikasikan reattachment position akibat dari arus balik aliran.

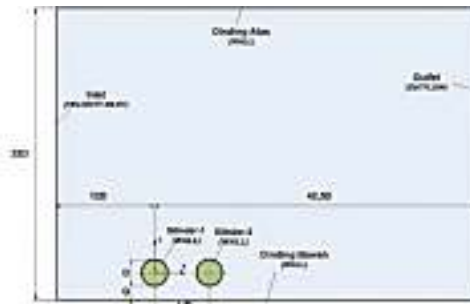


Gambar 2.12 Distribusi tekanan pada (a) silinder sirkular, (b) lower wall (c) Perbandingan antara C_{dp} dan C_{lp} terhadap variasi G/D pada kemiringan 20° (Ursula, 2018)

Posisi ini menjelaskan arah aliran terbagi dua. Pada daerah $-5 < X/D < 20$, daerah tersebut mengalami peningkatan tekanan pada lowerwall. Semakin besar variasi G/D , semakin cepat aliran mengalami proses recovery. Tekanan mengalami proses recovery pada daerah setelah $X/D > 20$, dimana tekanan pada lower wall menuju stabil atau konstan. Grafik 2.12 (c) menggambarkan perbandingan nilai CD_p dan CL_p terhadap variasi G/D . Nilai CD_p menghasilkan trendline naik disebabkan oleh momentum aliran semakin besar seiring dengan variasi G/D meningkat. Nilai CL_p mengalami peningkatan nilai dari $G/D = 0,1$ ke $G/D = 0,3$ dan pada $G/D = 0,3$ hingga $G/D = 0,5$ menunjukkan trendline turun. Semakin besar G/D , daerah lingkupan silinder sirkular menjauhi lingkupan daerah wake inclined wall.

2.2.2 Pengaruh Besar Celah pada Dua Silinder Sirkular dengan Dinding

Faktor yang paling mempengaruhi aliran pada dua silinder sirkular tandem dekat dinding adalah rasio jarak longitudinal antara kedua pusat silinder sirkular (L/D) dan rasio celah antara silinder sirkular dan dinding (G/D). Penelitian secara numerik terkait aliran fluida melintasi dua silinder sirkular tersusun tandem dekat dinding datar dilakukan oleh Widodo, (2010).

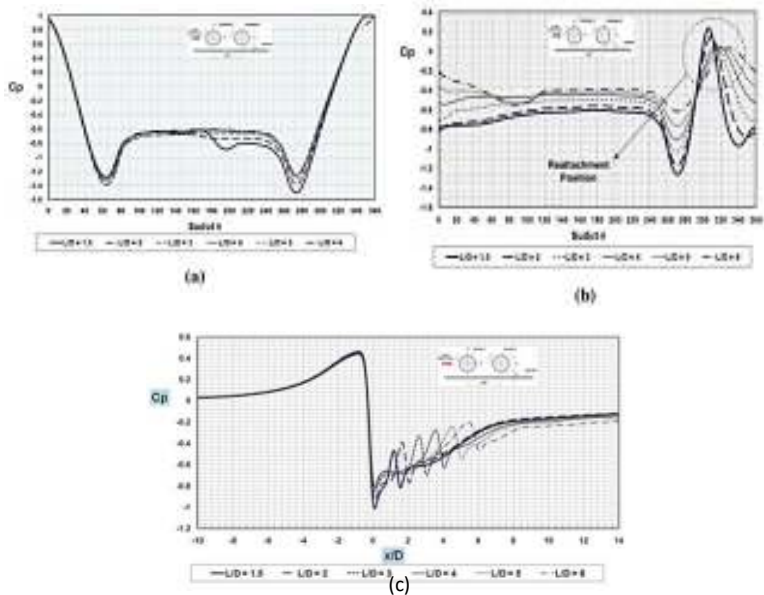


Gambar 2.13 Domain simulasi pada penelitian Numerik (Widodo, 2010)

Simulasi numerik dilakukan dengan variasi $L/D = 1,5; 2; 3; 4; 5;$ dan 6 , dimana L/D adalah rasio jarak longitudinal kedua silinder sirkular. Simulasi ini dilakukan pada rasio celah $G/D = 0,2$ konstan. Metode yang digunakan yaitu pemodelan 2D-steady flow dan pemodelan turbulensi yaitu Reynolds Stress Models (RSM). Simulasi dilakukan pada Bilangan Reynolds $5,3 \times 10^4$ didasarkan pada diameter silinder. Domain simulasi seperti pada Gambar 2.13.

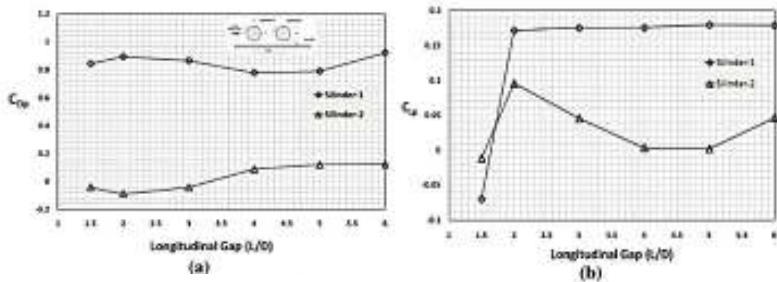
Hasil yang didapatkan dari simulasi numerik adalah aliran yang melewati silinder-1 mengalami akselerasi tertinggi pada sisi celah. Peningkatan L/D akan menurunkan akselerasi pada sisi celah. Hal ini disebabkan oleh adanya fenomena blockage yang dihasilkan dari silinder-2. Fenomena blockage ini dapat dilihat dari grafik koefisien tekanan yang meningkat pada sudut $170^\circ < \theta < 190^\circ$ pada Gambar 2.14 (a). Pada Gambar 2.16 (b) menunjukkan nilai koefisien tekanan yang negatif pada sisi atas silinder -2. Hal ini menunjukkan bahwa silinder-2 dilingkupi oleh free shear layer silinder-1. Adanya peningkatan koefisien tekanan pada lower side silinder-2 pada kisaran sudut $300^\circ < \theta < 330^\circ$ menunjukkan adanya puncak (peak) menjelaskan adanya fenomena reattachment yaitu penempelan kembali free shear layer silinder-1 setelah terseparasi. Peningkatan L/D akan mengurangi interaksi antara kedua silinder sirkular.

Distribusi koefisien tekanan pada dinding ditunjukkan pada Gambar 2.14 (c). Grafik koefisien tekanan menunjukkan bahwa terdapat blockage yang cukup besar saat aliran akan melintasi celah antara silinder-1 dengan dinding. Blockage ini ditunjukkan oleh nilai koefisien tekanan yang positif. Setelah melewati blockage, aliran akan mengalami akselerasi yang tajam saat melintasi lower side silinder-1. Hal ini ditunjukkan oleh nilai koefisien tekanan yang negatif. Setelah melintasi silinder-1, terjadi pressure recovery pada dinding yang ditunjukkan dengan grafik koefisien tekanan yang mulai konstan. Besarnya L/D akan memengaruhi pressure recovery tersebut yaitu pada $L/D > 12$.



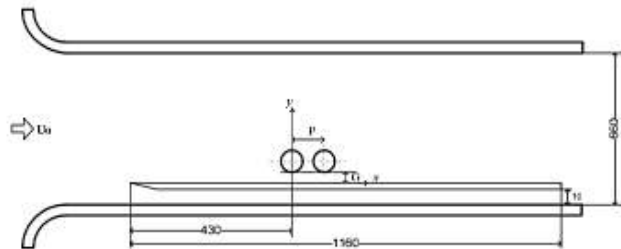
Gambar 2.14 Distribusi koefisien tekanan pada; (a) silinder-1, (b) silinder-2 dan (c) dinding bawah dengan variasi L/D (Widodo, 2010)

Koefisien drag tekanan (CD_p) dan koefisien lift tekanan (CL_p) ditunjukkan pada Gambar 2.15. Peningkatan L/D akan meningkatkan koefisien drag tekanan pada kedua silinder. Nilai koefisien drag tekanan yang negatif pada silinder-2 ($L/D < 4$) disebabkan oleh silinder-2 berada dalam daerah wake silinder-1. Keberadaan dinding menyebabkan adanya gaya lift yang ditunjukkan dengan koefisien lift tekanan. Hal ini menunjukkan bahwa terjadi gaya lift yang positif pada kedua silinder sirkular pada $L/D > 1,5$, namun gaya lift negatif terjadi ketika $L/D = 1,5$.



Gambar 2.15 Hasil koefisien tekanan (a) koefisien drag tekanan (C_{Dp}) dan (b) koefisien lift tekanan (C_{Lp}) pada silinder sirkular tandem dengan variasi jarak longitudinal (Widodo, 2010)

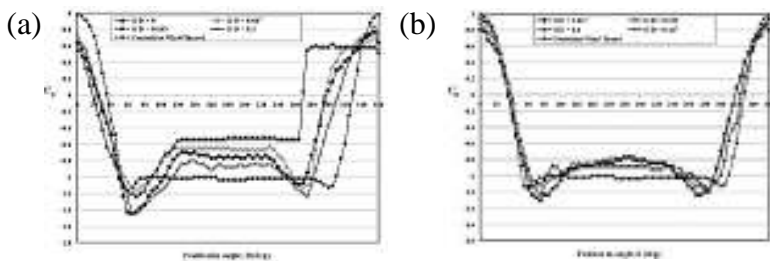
Penelitian secara eksperimen dilakukan oleh Triyogi et al, (2010) mengenai karakteristik aliran dua silinder sirkular tandem dekat dinding datar. Eksperimen dilakukan pada Bilangan Reynolds $5,3 \times 10^4$ dengan jarak pusat ke pusat antara dua silinder sirkular konstan pada $L/D = 1,5$. Gambar 2.16 menunjukkan skema pada eksperimen ini.



Gambar 2.16 Diagram skematik pada eksperimen (Triyogi et al., 2010)

Distribusi tekanan sepanjang permukaan silinder dan dinding diukur dengan memberi variasi rasio celah silinder sirkular ke dinding terhadap diameter silinder (G/D) pada $0 < G/D < 0,467$. Percobaan dilakukan di dalam wind tunnel. Kecepatan aliran di wind tunnel diatur pada 14 m/s, sesuai dengan Bilangan Reynolds $Re = 5,3 \times 10^4$ (berdasarkan diameter silinder sirkular D dan kecepatan aliran bebas).

Distribusi koefisien tekanan (C_p) di permukaan upstream silinder sirkular ditunjukkan pada Gambar 2.17 (a) untuk $G/D \leq 0,2$ menunjukkan bahwa distribusi C_p menunjukkan bentuk asimetris. Pada $G/D \leq 0,2$ tidak ada titik stagnasi dengan $C_p = 1$ di sisi depan silinder upstream. Tidak adanya titik stagnasi pada silinder upstream disebabkan posisi silinder yang dekat dengan plat datar. Efek blockage di celah antara silinder dan plat datar menyebabkan sebagian besar fluida mengalir ke sisi atas silinder. Ini menyebabkan tidak ada arus yang datang secara tegak lurus ke silinder sirkular. Gambar 2.17 (b) menunjukkan distribusi C_p untuk $0,2 < G/D < 0,467$ menunjukkan bahwa distribusi C_p cenderung lebih simetris. Dalam celah gap ini, titik stagnasi secara bertahap berangsur naik.

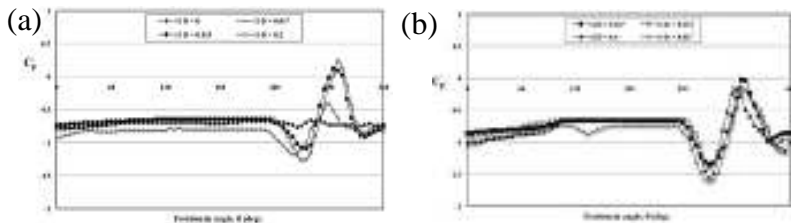


Gambar 2.17 Distribusi tekanan pada permukaan

Upstream silinder untuk $Re = 5,3 \times 10^4$:

(a). $0 < G/D < 0.2$ (b). $0.267 < G/D < 0.467$ (Triyogi et al., 2010)

Gambar 2.18 menunjukkan distribusi koefisien tekanan (C_p) di permukaan silinder downstream. Gambar 2.18 (a) menunjukkan distribusi C_p silinder downstream untuk $G/D < 0,2$. Hasilnya menunjukkan bahwa distribusi C_p asimetris. Puncak pada sisi bawah depan silinder terlihat pada masing-masing distribusi tekanan. Puncak ini merupakan reattachment dari shear layer yang terseparasi dari sisi bawah silinder upstream. Dari titik reattachment, shear layer bercabang menjadi dua shear layer.



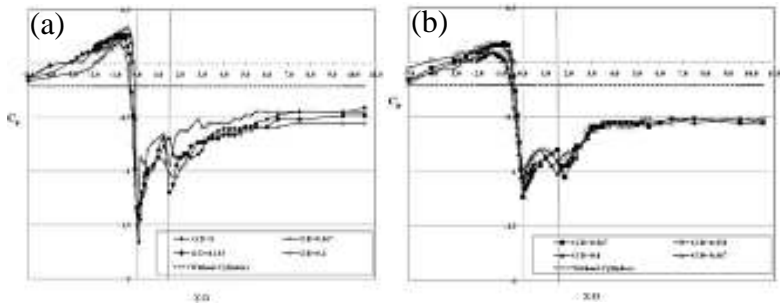
Gambar 2.18 Distribusi tekanan pada permukaan downstream silinder untuk $Re = 5,3 \times 10^4$:

(a). $0 < G/D < 0,2$, (b). $0.267 < G/D < 0,467$ (Triyogi et al., 2010)

Satu shear layer berlanjut ke arah downstream dan shear layer lainnya mengalir ke arah upstream, yang disebut backward dan forward shear layer. Shear layer terseparasi dari sisi atas silinder upstream melingkupi sisi atas dari silinder downstream, dan tidak ada fenomena reattachment dalam kasus ini. Kecenderungan ini juga diamati untuk $0,267 < G/D < 0,467$, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.18 (b).

Gambar 2.19 menunjukkan distribusi tekanan sepanjang dinding sebagai fungsi celah antara susunan silinder dan dinding (G/D). Gambar 2.19 (a) menunjukkan distribusi tekanan sepanjang dinding untuk $G/D < 0,2$. Hasil menunjukkan bahwa tekanan permukaan upstream menurun dengan meningkatnya rasio gap. Dua tekanan minimum diamati pada downstream setiap silinder,

dan tekanan minimum ini meningkat ketika rasio gap meningkat. Ketika aliran bergerak ke downstream, tekanan negatif mengalami recovery ke tekanan statis. Juga diamati bahwa lokasi tekanan minimum bergerak ke downstream ketika rasio gap meningkat. Kecenderungan ini juga diamati untuk $0,267 < G/D < 0,467$, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.19 (b).

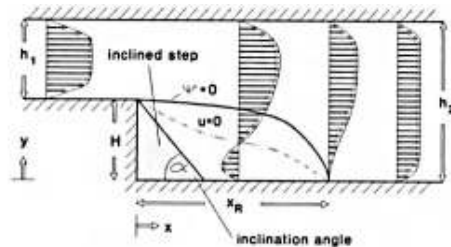


Gambar 2.19 Distribusi tekanan pada plat datar untuk
 $Re = 5,3 \times 10^4$:
 (a). $0 < G/D < 0.2$, (b). $0.267 < G/D < 0.467$
 (Triyogi et al., 2010)

Kemudian distribusi tekanan kedua silinder dan dinding hasil eksperimen (Triyogi et al, 2010) dibandingkan dengan hasil numerik oleh Widodo, (2010) untuk rasio gap $G/D = 0,067$ dan $0,267$. untuk silinder upstream, hasil perbandingan tidak selalu sesuai. Berdasarkan hasil numerik, arus dipercepat di sisi celah antara silinder dan plat datar, itu bertentangan dengan hasil penelitian secara eksperimen. Untuk silinder downstream, hasil perbandingan memberikan kesepakatan yang cukup begitu juga hasil distribusi tekanan di dinding datar.

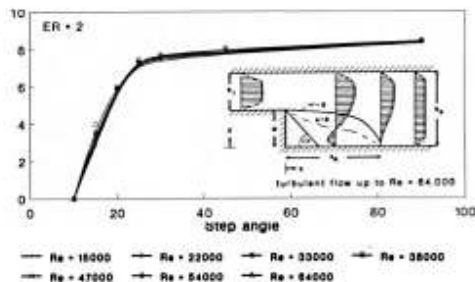
2.2.3 Pengaruh Kemiringan Dinding terhadap Aliran pada Backward Facing Step

Ruck dan Makiola, (1993) telah melakukan eksperimen pada wind tunnel mengenai pengaruh kemiringan dinding terhadap aliran pada backward facing step. Variasi eksperimen dilakukan pada sudut kemiringan 10° , 15° , 20° , 25° , 30° , 45° , dan 90° , dan rasio ekspansi (ER) sebesar 1,48, 2,0, dan 3,27. Eksperimen dilakukan pada Bilangan Reynolds hingga 64.000 yang didasarkan pada ketinggian step H. Geometri eksperimen dapat dilihat pada Gambar 2.20.



Gambar 2.20 Skema alat pada eksperimen (Ruck dan Makiola, 1993)

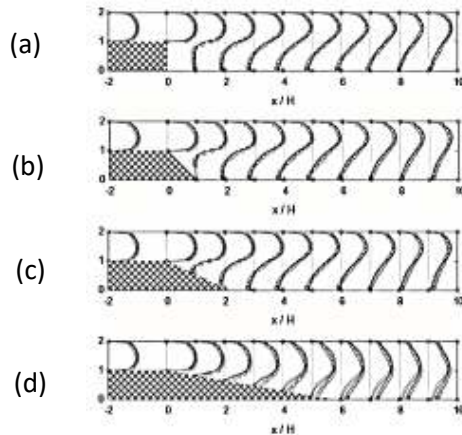
Hasil yang didapatkan pada eksperimen ini yaitu terjadi penurunan panjang reattachment saat sudut kemiringan diturunkan pada aliran dengan $Re > 5.000$ dan ER 3,27.



Gambar 2.21 Panjang reattachment dalam fungsi step angle untuk $Re > 15.000$ (Ruck dan Makiola, 1993)

Panjang reattachment tidak berubah secara signifikan pada sudut kemiringan 90° hingga 45° , namun panjang reattachment konsisten menurun secara cepat pada sudut kemiringan dibawah 45° . Fenomena ini mengindikasikan adanya peredaman free shear layer pada sudut kemiringan rendah akibat keberadaan dinding pada downstream. Panjang reattachment menjadi konstan pada saat $Re > 10.000$, sehingga identifikasi panjang reattachment untuk tiap sudut kemiringan dan rasio ekspansi dapat dilakukan. Variasi panjang reattachment dapat dilihat pada Gambar 2.21.

Louda et al,(2013) telah melakukan simulasi numerik 2D dan 3D pada aliran melintasi backward facing inclined steps. Simulasi numerik ini menggunakan pemodelan $k-\omega$ two equation untuk melakukan prediksi skala turbulensi. Penelitian dilakukan pada aliran turbulen inkompresibel pada inklinasi ($\alpha = 10^\circ, 25^\circ, 45^\circ$ dan 90°) dan dengan Bilangan Reynolds sebesar 15000 dan 64000. Simulasi numerik ini kemudian dibandingkan dengan data hasil eksperimen Ruck dan Makiola, (1993).



Gambar 2.22 Profil kecepatan pada $Re=15000$ dengan inclination angle : (a) 90° , (b) 45° , (c) 25° dan (d) 10° (o : data eksperimen, - : data simulasi 3D, --- : data simulasi 2D)

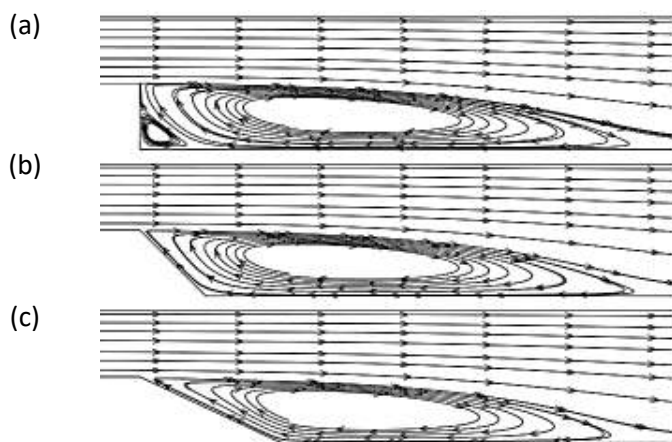
(Louda et al., 2013)

Hasil simulasi numerik Louda et al, (3013) menghasilkan profil kecepatan dalam 2D dan 3D dengan Bilangan Reynolds 15000 seperti pada Gambar 2.22. Profil kecepatan tersebut ditinjau dari downstream yang berbeda untuk setiap kemiringan. Hasil simulasi sebanding dengan data hasil eksperimen, kecuali pada sudut kemiringan terkecil. Hal ini disebabkan oleh simulasi yang tidak mengikuti pelebaran luasan secara cepat dan percepatan setelah reattachment sangat kecil.

Selain profil kecepatan, penelitian Louda et al,(2013) juga menghasilkan pola streamline dan recirculation zone yang terbentuk pada inclination angle sebesar 90°, 45°, dan 25°. Gambar 2.23 menunjukkan pola streamline pada setiap inclination angle. Nilai recirculation zone dapat diwakili dengan recirculation length yang dihitung dari titik awal tepi step. Table 2.1 menunjukkan hasil perhitungan recirculation length pada simulasi dibandingkan dengan data eksperimen Ruck dan Makiola,(1993). Dari data tersebut terlihat bahwa semakin besar inclination angle, maka semakin besar recirculation zone yang terbentuk.

Tabel 2.1 Recirculation Length (Sumber : Louda et al., 2013)

β (°)	Experiment	2D	3D (center-plane)
10	n/a	7.43	6.58
25	7.10	8.46	8.33
45	7.85	8.51	8.48
90	8.20	8.53	8.49



Gambar 2.23 Sreamline pada inclination angle (a) 90° ,
(b) 45° , dan (c) 25°
(Louda et al., 2013)

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Tugas akhir ini menggunakan metode penelitian yaitu metode simulasi numerik atau CFD (Computational Fluid Dynamics). Terdapat tiga tahapan dalam simulasi numerik yaitu pre-processing, processing dan post-processing. Pre-processing adalah tahapan pemodelan permasalahan. Processing adalah tahap perhitungan secara iterasi untuk mendapatkan penyelesaian. Post-processing adalah tahap pengambilan data hasil penyelesaian berupa data kuantitatif dan data kualitatif. Tahapan-tahapan dalam simulasi numerik dijalankan dengan menggunakan tiga software yaitu Solidworks 2014, Gambit versi 2.4.6, dan Fluent versi 19.1.

Tahapan pre-processing terdiri dari pembuatan domain simulasi dengan menggunakan software Solidworks 2014. Hasil pembuatan domain menghasilkan data geometri (.STEP) untuk selanjutnya dilakukan meshing dan penetapan boundary condition pada domain simulasi menggunakan software ANSYS Gambit versi 2.4.6. Hasil yang didapatkan dari ANSYS Gambit berupa data mesh (.msh), data tersebut kemudian digunakan untuk dilanjutkan pada tahap processing yaitu tahap perhitungan secara iterasi untuk mendapatkan penyelesaian dengan menggunakan software ANSYS Fluent versi 19.1 Tahap terakhir yaitu post-processing dilakukan pengambilan data hasil penyelesaian berupa data-data kuantitatif seperti koefisien tekanan pada silinder sirkular dan dinding, dan data-data kualitatif seperti kontur tekanan dan kecepatan.

3.1 Pre-processing

3.1.1 Pembuatan Domain Simulasi dan Boundary Condition

Pembuatan domain simulasi untuk menganalisis karakteristik aliran fluida pada dua silinder sirkular tandem dekat dinding miring dilakukan seperti pada Gambar 3.1. Pembuatan domain dilakukan menggunakan software Solidworks dan

mengeksplor data geometri dalam format STEP AP203. Domain simulasi terdiri dari dua silinder sirkular yang disusun tandem dengan diameter sebesar D dan jarak pusat ke pusat kedua silinder sirkular sebesar $L = 1,5D$. Kedua silinder sirkular tersebut diletakkan dekat dinding dengan jarak celah sebesar G dan kemiringan dinding sebesar α terhadap bidang horizontal. Pada domain tersebut dilakukan variasi besar celah (G) sebesar $0,1D$, $0,2D$, $0,3D$, $0,4D$, $0,5D$, $1D$ dan kemiringan dinding (α) sebesar 0° , 10° dan 20° . Nilai variabel geometri diatas menggunakan skala diameter silinder yaitu $D = 40 \text{ mm}$.

Penetapan boundary condition diberikan pada domain aliran agar software CFD mampu mengenali elemen-elemen yang dikaitkan dengan boundary condition tertentu sehingga hasil simulasi sesuai dengan fenomena fisik yang terjadi. Penetapan boundary condition dilakukan pada software ANSYS Gambit.

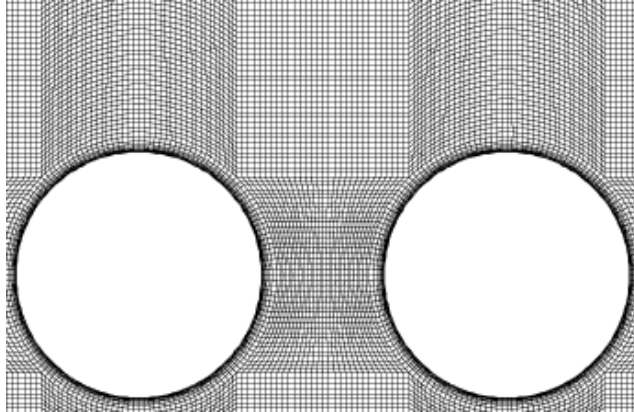


Gambar 3.1 Domain simulasi dan boundary condition

3.1.2 Pembuatan Meshing

Data geometri berupa format STEP AP203 dari software Solidworks di-import pada ANSYS Gambit untuk proses meshing. Meshing adalah tahap pembagian sebuah domain simulasi menjadi volume yang lebih kecil yang disebut sebagai elemen. Meshing berfungsi sebagai control volume pada domain simulasi yang akan diselesaikan oleh software ANSYS Fluent. Meshing dengan kualitas baik dapat menghasilkan data yang akurat. Bentuk meshing yang digunakan yaitu quadrilateral structured 2-D mesh. Gambar 3.2 merupakan meshing yang digunakan dalam domain

simulasi. Selanjutnya data domain disimpan dengan format.msh yang akan diproses oleh ANSYS Fluent.



Gambar 3.2 Meshing dari domain simulasi

3.2 Processing

3.2.1 Pemodelan Fenomena Fisis

Pemodelan fenomena fisis yang digunakan pada tugas akhir ini yaitu pressure-based solver, steady flow, dan shear stress transport $k-\omega$ turbulence modeling dilakukan pada software ANSYS Fluent versi 19.1. Pressure-based solver dipilih berdasarkan asumsi incompressible flow pada batasan masalah penelitian. Steady flow dipilih berdasarkan asumsi steady flow pada batasan masalah penelitian. Pemodelan turbulen shear stress transport $k-\omega$ turbulence modeling dipilih berdasarkan literatur (Versteeg, 2007) yang menyatakan bahwa pemodelan turbulensi shear stress transport $k-\omega$ memberikan performa yang terbaik untuk kasus simulasi pada kasus aliran eksternal seperti adverse pressure gradient dan free shear layer. Pemodelan turbulensi shear stress transport $k-\omega$ juga memiliki performa baik dalam menganalisis aliran yang dekat dengan dinding.

3.2.2 Pemilihan Properti Fluida Kerja

Fluida kerja yang digunakan dalam simulasi yaitu udara dengan temperatur 300 K (27°C) pada tekanan atmosfer. Properti udara didapatkan dari literatur (Incropera et al,2011) dengan nilai densitas fluida (ρ) sebesar 1,1614 kg/m³ dan viskositas absolut (μ) sebesar 1,846×10⁻⁵ kg/m.s.

3.2.3 Penginputan nilai pada Boundary Condition

Parameter yang dimasukkan pada boundary condition didasarkan pada literatur yang telah ada dengan menggunakan software ANSYS Fluent. Nilai-nilai yang akan di-input pada boundary condition yaitu velocity inlet, intensitas turbulensi, dan length scale. Bilangan Reynolds yang digunakan pada tugas akhir didasarkan pada data eksperimental (Gu et al,2011) yang melakukan pengukuran tekanan pada $Re = 5 \times 10^4$. Dari Bilangan Reynolds tersebut, didapat nilai velocity inlet sebesar 20 m/s. Intensitas turbulensi yang digunakan berdasarkan eksperimen (Gu et al,2011) sebesar 0,1% dan length scale sebesar 0,0044 m. Nilai length scale didapatkan dari persamaan buku manual fluent dan input yang digunakan pada penelitian ini. Persamaan length scale yaitu:

$$l = 0,4 \delta_{99} = 0,4 \left(\frac{0,382 Re^{4/5} \mu}{\rho V} \right)$$

Dengan mengasumsikan bahwa aliran pada inlet telah melintasi plat datar dan berada pada kondisi tepat transisi menuju turbulen. Bilangan Reynolds aliran transisi pada plat datar adalah 5×10^5 berdasarkan pada literatur (Pritchard, 2011).

3.2.4 Solution Method

Tugas akhir ini menggunakan solution method yaitu pada pressure-velocity coupling diatur untuk menggunakan Coupled, sedangkan spatial discretization pada pressure, momentum, turbulent kinetic energy, dan specific dissipation rate diatur untuk

menggunakan second order upwind untuk menghasilkan hasil simulasi dengan akurasi yang baik.

3.2.5. Monitor

Nilai yang dimonitor pada simulasi numerik ini adalah nilai residual. Nilai residual adalah salah satu kriteria konvergensi dalam suatu simulasi numerik. Pada tugas akhir ini, simulasi diasumsikan telah konvergen apabila nilai residual telah mencapai ordo 10^{-6} .

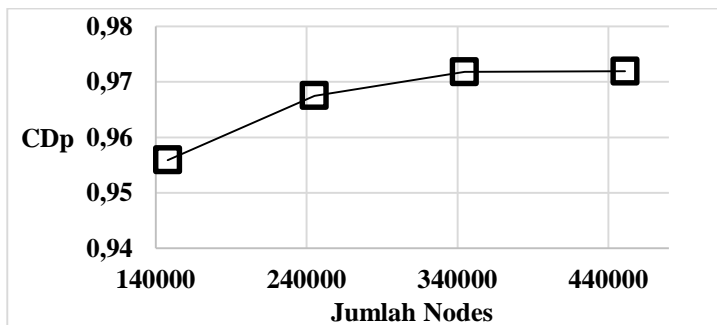
3.2.6. Solution Initialization

Initialization adalah proses untuk memberikan nilai awal pada simulasi numerik. Metode yang dilakukan untuk initialization adalah metode standard initialization dengan nilai acuan yaitu nilai pada inlet.

3.3. Post-processing

3.3.1 Grid Independency Test

Grid independency test dilakukan untuk mengetahui pengaruh kualitas meshing terhadap hasil data simulasi numerik yang didapatkan dengan cara membandingkan kerapatan meshing.



Gambar 3.3 Perbandingan nilai CDp tiap tingkat kerapatan mesh

Perbandingan dilakukan mulai dari kerapatan mesh yang renggang (coarse), menengah (medium), rapat (fine), dan sangat rapat (very fine). Nilai yang dibandingkan pada grid independency test adalah koefisien drag tekanan dari silinder-1. Gambar 3.3 menunjukkan perbandingan koefisien drag tekanan CDp tiap tingkat kerapatan mesh.

Tabel 3.1 Nilai CDp silinder sirkular 1 pada setiap tipe mesh

Tipe Mesh	y+	jumlah nodes	CDp	Relative error(%)
A	1.5	147976	0.9559	-
B	1.3	245234	0.9675	1.1989
C	1	344744	0.9718	0.4424
D	0.5	451106	0.9719	0.0102

Tabel 3.1 merupakan data perbandingan nilai CDp silinder-1 pada setiap tipe mesh. Pengamatan pada Gambar 3.3 dan tabel 3.1 menunjukkan bahwa nilai CDp tidak berubah signifikan pada tingkat kerapatan mesh 344744 dan 451106 nodes. Kesimpulan perubahan nilai yang tidak signifikan tersebut turut didukung oleh kesalahan relatif yang cukup rendah yaitu 0,4424%. Berdasarkan pengamatan tersebut, maka tingkat kerapatan mesh yang digunakan pada tugas akhir ini adalah kerapatan mesh C dengan jumlah nodes 344744.

3.4 Persamaan Bilangan tak Berdimensi

Bilangan tak berdimensi digunakan dalam pelaksanaan tugas akhir ini yaitu dalam proses simulasi dan pengambilan data. Bilangan tak berdimensi yang digunakan dalam proses simulasi adalah Bilangan Reynolds (Re), sedangkan bilangan tak berdimensi yang diambil sebagai data kuantitatif adalah koefisien tekanan (Cp) pada kedua silinder sirkular dan dinding, koefisien

drag tekanan (CDp), dan koefisien lift tekanan (CLp) pada kedua silinder sirkular.

Bilangan Reynolds (Re)

Bilangan Reynolds merupakan rasio antara gaya inersia akibat kecepatan massa fluida dengan gaya viscous yang disebabkan oleh adanya gaya gesek yang ditimbulkan oleh viskositas fluida.

$$Re = \frac{\rho V_{\infty} D}{\mu}$$

Koefisien Tekanan (Cp)

Koefisien tekanan merupakan rasio antara gaya tekanan yang terjadi pada suatu bodi dengan gaya inersia fluida. Gaya tekanan dihitung dari selisih antara tekanan pada suatu titik di bodi dengan tekanan statis pada free-stream, sedangkan gaya inersia dihitung dari tekanan dinamis free-stream.

$$C_p = \frac{p - p_{\infty}}{\frac{1}{2} \rho V_{\infty}^2}$$

Koefisien Drag akibat Tekanan (CDp)

Koefisien drag total merupakan gabungan dari koefisien drag akibat tekanan dan koefisien drag akibat gesekan seperti pada tinjauan pustaka persamaan 2.5. Namun silinder sirkular memiliki koefisien drag akibat tekanan yang jauh lebih dominan dibandingkan dengan koefisien drag akibat gesekan, sehingga dalam simulasi ini hanya menghitung koefisien drag akibat tekanan. Koefisien drag akibat tekanan merupakan integrasi dari koefisien tekanan. Koefisien ini menunjukkan gaya drag pada bodi yang dihasilkan dari tekanan. Gaya drag memiliki arah sejajar dengan sumbu x pada gambar domain 3.1.

$$C_{Dp} = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} C_p \cos(\theta) d\theta$$

Koefisien Lift akibat Tekanan (CLp)

Koefisien lift total merupakan gabungan dari koefisien lift akibat tekanan dan koefisien lift akibat gesekan seperti pada tinjauan pustaka persamaan 2.6. Namun silinder sirkular memiliki koefisien lift akibat tekanan yang jauh lebih dominan dibandingkan dengan koefisien lift akibat gesekan, sehingga dalam simulasi ini hanya menghitung koefisien lift akibat tekanan. Koefisien lift tekanan merupakan integrasi dari koefisien tekanan. Koefisien ini menunjukkan gaya lift pada bodi yang dihasilkan dari tekanan. Gaya lift memiliki arah sejajar dengan sumbu y pada gambar domain 3.1.

$$C_{Lp} = -\frac{1}{2} \int_0^{2\pi} C_p \sin(\theta) d\theta$$

Integrasi Komposit Simpson's Rule

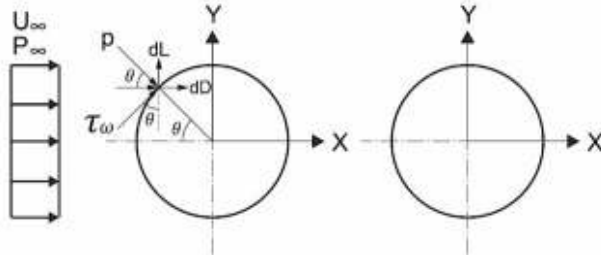
Dalam menyelesaikan integrasi dari koefisien drag dan lift akibat tekanan digunakan metode numerik aturan Simpson 1/3 segmen berganda sebagai berikut :

$$\int_a^b f(x)dx \approx \underbrace{(b-a)}_{\text{lebar}} \underbrace{\frac{f(x_0) + 4 \sum_{i=1}^{i=1,3,5,\dots} f(x_i) + 2 \sum_{j=2}^{j=2,4,6,\dots} f(x_j) + f(x_n)}{3n}}_{\text{Tinggi rata-rata}}$$

dimana :

- $f(x_i)$ = perkalian dari fungsi data ganjil dimana $i = 1, 3, 5, \dots, n-1$
- $f(x_j)$ = perkalian dari fungsi data genap dimana $j = 2, 4, 6, \dots, n-2$
- $b = 2\pi$ dan $a = 0$
- $f(x_0) = C_p(0) \cdot \cos(0)$
- $f(x_n) = C_p(2\pi) \cdot \cos(2\pi)$
- n = jumlah data

Persamaan koefisien drag dan koefisien lift akibat tekanan diatas digambarkan pada skema yang ditunjukkan oleh Gambar 3.4 dibawah. Dimana teta (θ) merupakan sudut antara titik posisi pengambilan dan arah sumbu.



Gambar 3.4 Skema gaya drag dan lift pada silinder sirkular

3.5 Hasil yang akan diperoleh

Adapun hasil post-processing simulasi numerik yang akan diperoleh berupa data kuantitatif dan kualitatif (visualisasi aliran) karakteristik aliran terhadap pengaruh celah dan kemiringan pada dua silinder sirkular disusun tandem dekat dinding miring.

Data kuantitatif yang akan diperoleh adalah sebagai berikut

1. Grafik Distribusi Tekanan (C_p) sebagai fungsi sudut teta (θ) kedua silinder sirkular
2. Grafik Distribusi Tekanan (C_p) sebagai fungsi panjang wall (X/D) pada lower wall
3. Grafik Koefisien Drag akibat Tekanan (CD_p)
4. Grafik Koefisien Lift akibat Tekanan (CL_p)

Data kualitatif yang akan diperoleh adalah sebagai berikut

1. Streamlines aliran melintasi dua silinder sirkular disusun tandem dekat dinding
2. Kontur Kecepatan dan kontur tekanan aliran melintasi dua silinder sirkular disusun tandem dekat dinding

(Halaman sengaja dikosongkan)

BAB IV

ANALISA DAN PEMBAHASAN

Analisa dan pembahasan dilakukan untuk menganalisis karakteristik aliran yang melintasi dua silinder sirkular dekat dinding dengan variasi G/D dan inclined wall angle (α). Variasi G/D yang dilakukan sebesar 0,1, 0,2, 0,3, 0,4, 0,5, dan 1, serta inclined wall angle (α) sebesar 0° , 10° , dan 20° . Karakteristik aliran ini digambarkan dengan data kualitatif berupa visualisasi aliran dan data kuantitatif berupa pressure coefficient (C_p) pada kedua silinder sirkular dan permukaan lower wall, drag pressure coefficient (CD_p) dan lift pressure coefficient (CL_p) pada kedua silinder sirkular. Pengambilan koefisien drag dan lift akibat tekanan didasarkan pada studi literatur yang menyatakan bahwa pengaruh tekanan terhadap gaya drag dan gaya lift pada silinder sirkular jauh lebih besar dibandingkan pengaruh gesekan.

Pada bab ini, pembahasan yang akan dianalisa berupa karakteristik aliran dengan pengaruh variasi G/D pada setiap variasi inclined wall angle (α). Pembahasan dilanjutkan dengan pengaruh variasi inclined wall angle (α) pada $G/D = 0,2$ dan 1. Analisa dan pembahasan diakhiri dengan membandingkan data kuantitatif pada variasi $G/D = 0,2$ tanpa inclined wall angle (α) dengan penelitian terdahulu secara eksperimental.

4.1 Pengaruh variasi G/D terhadap karakteristik aliran tanpa inclined wall angle (α) = 0°

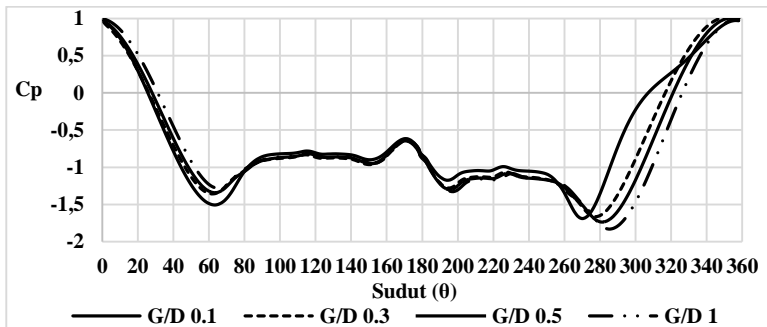
Keberadaan dua silinder sirkular pada variasi G/D sebesar 0,1, 0,3, 0,5, dan 1 dekat dinding datar dapat memengaruhi distribusi tekanan pada kedua silinder sirkular tersebut. Fenomena ini dapat dilihat dari pengolahan data secara kualitatif berupa visualisasi aliran yaitu velocity contour, pressure contour, streamline dan data kuantitatif digambarkan dalam sebuah grafik distribusi tekanan masing-masing silinder sirkular dan lower wall.

Pada range $0^0 < \theta < 180^0$ menunjukkan sudut posisi upper side dari masing-masing silinder sirkular sedangkan pada range $180^0 < \theta < 360^0$ menunjukkan sudut posisi lower side dari masing-masing silinder sirkular. Peletakan pusat silinder-1 berada pada $X/D = 0$ dan peletakan pusat silinder-2 pada $X/D = 1,5$.

Gambar 4.1 merupakan grafik distribusi tekanan (C_p) silinder-1 terhadap variasi G/D sebesar 0,1, 0,3, 0,5, dan 1 tanpa inclined wall angle. Pengamatan pada distribusi C_p upper side silinder-1 dengan $G/D = 0,1$ memiliki C_p maksimum lebih rendah dari G/D lainnya. Ketika G/D ditingkatkan, titik stagnasi secara bertahap akan berangsur naik mendekati $C_p = 1$. Hal ini mengindikasikan bahwa pada $G/D \leq 0,2$ memiliki blockage yang besar antara silinder dengan lower wall sehingga aliran cenderung mengalir ke upper side silinder dan tidak ada aliran yang mengalir tegak lurus pada silinder sirkular. Pengamatan lain pada distribusi C_p upper side silinder-1 pada C_p minimum $G/D = 0,1$ memiliki C_p minimum yang lebih rendah dari G/D lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa pada $G/D = 0,1$ aliran mengalami akselerasi di sisi atas silinder lebih tinggi dibandingkan pada G/D lainnya. Hal ini disebabkan karena adanya blockage yang besar sebelum memasuki sisi celah bawah sehingga laju massa aliran terdefleksi mengalir ke sisi atas silinder-1.

Pengamatan pada distribusi C_p lower side silinder-1 pada $G/D = 0,1$ C_p maksimum memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan G/D lainnya. C_p maksimum akan meningkat dan bergeser menuju trailing edge saat G/D ditingkatkan menuju 0,2. Pengamatan pada C_p minimum menunjukkan bahwa $G/D = 0,1$ aliran mengalami akselerasi yang lebih rendah secara signifikan pada sisi bawah-depan ($270^0 < \theta < 360^0$) dibandingkan G/D lainnya. Peningkatan G/D akan meningkatkan akselerasi aliran pada sisi bawah-depan silinder-1 ($270^0 < \theta < 360^0$) dan menggeser C_p minimum menuju leading edge. Hal ini menunjukkan aliran lebih cepat mencapai kecepatan maksimum

dengan akselerasi yang lebih besar karena blockage yang berkurang. Akibatnya terjadi pergeseran titik separasi menuju leading edge karena pengaruh lower wall yang semakin kecil (sudut 250° menuju 260°). Penurunan nilai C_p pada $G/D = 0,1$ mengalami ketidak teraturan pada daerah ($300^\circ < \theta < 335^\circ$) hal ini mengindikasikan adanya pengaruh blockage pada daerah tersebut. Selain itu, aliran juga mengalami perlambatan yang lebih tinggi pada $G/D = 0,1$ dibandingkan dengan rasio G/D lainnya. Perlambatan ini menghasilkan rata-rata tekanan sisi bawah belakang ($180^\circ < \theta < 270^\circ$) yang lebih tinggi dari rasio G/D lainnya. Perlambatan tersebut tidak mengalami perubahan yang signifikan pada $G/D \geq 0,2$.

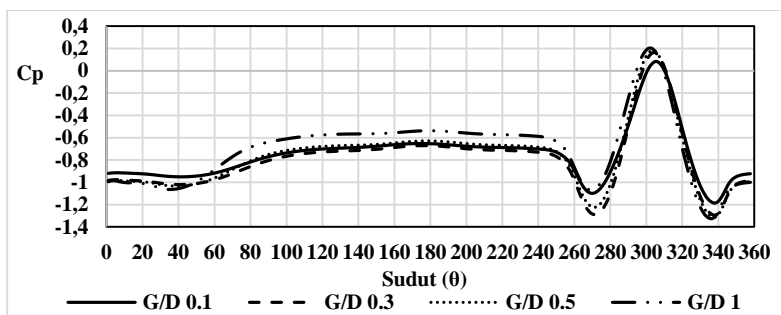


Gambar 4.1 Grafik C_p silinder-1 terhadap variasi G/D tanpa kemiringan dinding ($\alpha = 0^\circ$)

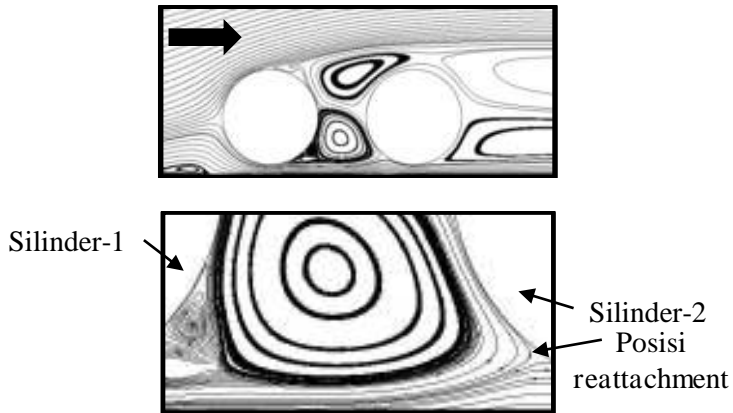
Pengamatan pada grafik C_p silinder-1 menunjukkan bahwa keberadaan silinder-2 memberikan pengaruh terhadap blockage sisi celah antar kedua silinder. Hal tersebut terlihat dimana blockage tersebut menimbulkan adanya forward shear layer yang ditandai dengan adanya peak pada kisaran ($170^\circ < \theta < 190^\circ$). Pengamatan pada keseluruhan grafik C_p silinder-1 menunjukkan bahwa penurunan tekanan pada lower side silinder lebih besar dari pada penurunan tekanan pada upper side silinder.

Hal ini mengindikasikan bahwa akselerasi di sisi celah lower side antara silinder dengan lower wall lebih besar dari pada akselerasi di upper side silinder sirkular, ini diakibatkan oleh luas penampang di bagian bawah silinder sirkular lebih kecil dibandingkan dengan luas penampang pada sisi atas silinder sirkular.

Gambar 4.2 merupakan grafik distribusi tekanan (C_p) silinder-2. Pengamatan pada keseluruhan variasi G/D didapatkan distribusi C_p upper side silinder-2 seluruhnya berharga negatif hal ini menunjukkan bahwa free-shear layer silinder-1 melingkupi silinder-2. Pengamatan pada distribusi C_p lower side silinder-2 pada keseluruhan variasi G/D kisaran sudut $300^\circ < \theta < 330^\circ$, menunjukkan adanya puncak (peak), hal ini menjelaskan adanya fenomena reattachment yaitu pelekatan kembali shear layer bawah silinder-1 pada silinder-2 bagian bawah, dimana pada posisi tersebut aliran fluida pada sisi celah terbagi dalam forward shear layer yang menuju silinder-1 dengan backward shear layer yang bergerak ke dalam celah silinder sirkular-2. Posisi titik reattachment ditunjukkan pada Gambar 4.3. Peningkatan G/D menyebabkan puncak reattachment semakin naik. Hal ini mengindikasikan pada G/D besar, pelebaran stremtube pada lower side silinder meningkat sehingga meningkatkan tekanan dan peak meningkat.



Gambar 4.2 Grafik C_p silinder-2 terhadap variasi G/D tanpa kemiringan dinding ($\alpha = 0^\circ$)

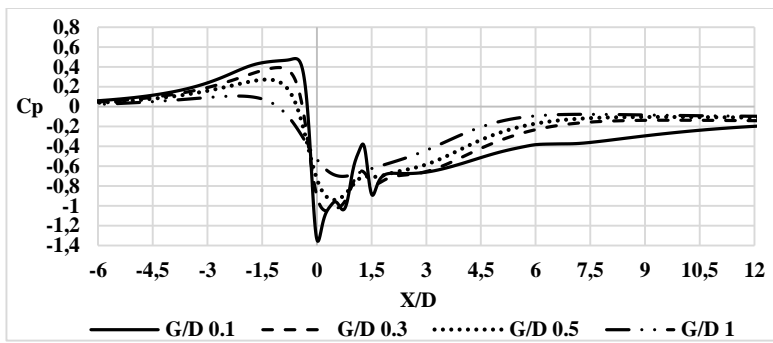


Gambar 4.3 Detail posisi reattachment pada $G/D = 0,1$ tanpa kemiringan dinding ($\alpha = 0^\circ$)

Pada lower side silinder-2, yaitu pada C_p minimum akan menurun ketika G/D ditingkatkan hingga $G/D = 0,3$. Namun peningkatan G/D lebih lanjut akan meningkatkan nilai C_p minimum. Hal ini mengindikasikan bahwa $G/D = 0,3$ merupakan jarak optimum antara silinder dengan lower wall. Akselerasi yang semakin besar pada lower side silinder-2 ($\theta = 270^\circ$) karena blockage yang berangsur menghilang tidak lagi meningkat saat G/D ditingkatkan lebih lanjut ($G/D > 0,3$). Selanjutnya tekanan mulai naik menunjukkan adanya perlambatan, pada $G/D = 1$ memiliki perlambatan paling besar dibanding G/D lainnya. Perlambatan ini menghasilkan rata-rata tekanan sisi bawah belakang ($180^\circ < \theta < 270^\circ$) yang lebih tinggi dari rasio G/D lainnya.

Tekanan pada lower side kedua silinder sirkular dapat dipengaruhi oleh adanya celah sempit/jarak gap yang kecil. Untuk mengetahui pengaruh tersebut, pengolahan data kuantitatif berupa nilai C_p lower wall dapat dibentuk ke dalam grafik. Gambar 4.4 merupakan grafik distribusi tekanan (C_p) lower wall terhadap variasi G/D sebesar 0,1, 0,3, 0,5, dan 1 pada inclined wall angle (α)

sebesar 0° . Indikasi terbentuknya blockage dapat dilihat dengan adanya peak pada daerah $-4 < X/D < -0,5$. Ketajaman peak ini menjelaskan besar blockage yang terbentuk. Nilai C_p maksimum (peak) pada $G/D = 0,1$ lebih besar dibandingkan G/D lainnya. Peningkatan G/D menunjukkan ketajaman peak yang semakin rendah hal ini mengindikasikan bahwa blockage yang terbentuk semakin kecil.



Gambar 4.4 Grafik C_p lower wall terhadap variasi G/D tanpa kemiringan dinding ($\alpha = 0^\circ$)

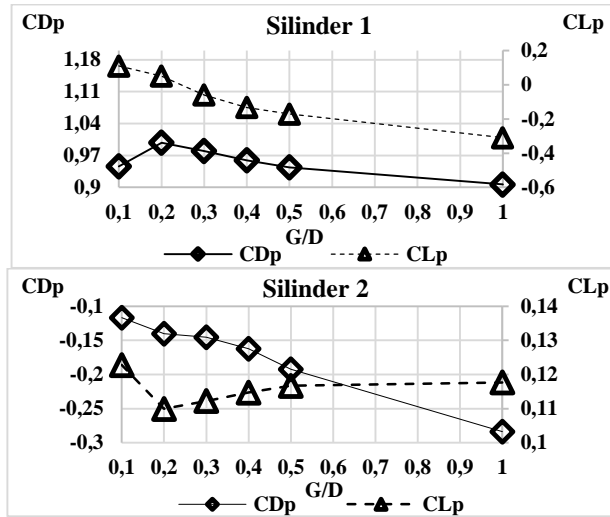
Dua tekanan minimum diamati pada grafik C_p lower wall yaitu pada daerah $X/D = 0$ dan $X/D = 1,5$. Daerah ini merupakan pusat celah antara silinder-1 dan silinder-2 terhadap lower wall. C_p minimum pada $G/D = 0,1$ lebih rendah dibandingkan G/D lainnya. Semakin besar G/D , C_p minimum semakin naik dan bergeser ke belakang. Hal ini mengindikasikan bahwa semakin besar G/D maka akselerasi maksimum semakin kecil dan akselerasi maksimum tidak lagi pada celah yang paling sempit, ini menunjukkan adanya vena contracta. Pada daerah $1,5 < X/D < 10$, tekanan pada lower wall mulai meningkat. Hal ini disebabkan oleh pelebaran streamtube pada daerah tersebut, yang mengakibatkan aliran mengalami perlambatan. Tekanan mengalami proses recovery pada daerah setelah $X/D > 12$, dimana tekanan pada lower

wall menuju stabil atau konstan. Semakin besar G/D , semakin cepat tekanan mengalami proses recovery.

Karakteristik aliran yang berbeda pada setiap G/D akan memengaruhi gaya drag dan gaya lift yang bekerja pada kedua silinder sirkular. Gambar 4.5 merupakan grafik perbandingan antara CD_p dan CL_p terhadap variasi G/D tanpa inclined wall angle ($\alpha = 0^\circ$) pada silinder-1 dan silinder-2. Pada silinder-1 nilai CD_p mengalami peningkatan nilai dari $G/D = 0,1$ ke $G/D = 0,2$, hal ini disebabkan oleh pengaruh blockage yang berkurang pada $G/D = 0,2$. Dimana blockage yang besar pada $G/D = 0,1$ menurunkan tekanan pada sisi bawah depan silinder-1 sesuai dengan Gambar 4.1 yang menunjukkan nilai C_p maksimum yang lebih rendah. Sehingga peningkatan menuju $G/D = 0,2$ akan meningkatkan tekanan sisi bawah depan silinder-1 karena blockage yang berkurang dan nilai CD_p meningkat. Peningkatan G/D lebih lanjut akan menurunkan nilai CD_p secara bertahap. Hal ini disebabkan oleh tidak ada pengaruh blockage pada variasi G/D yang semakin besar sehingga meningkatkan akselerasi aliran di sisi bawah dan aliran menjadi simetris, dengan distribusi C_p sisi belakang yang tidak berubah signifikan maka CD_p juga menurun akibat perbedaan tekanan yang menurun antara sisi depan dan sisi belakang silinder-1.

Nilai CL_p mengalami penurunan nilai yang konsisten dari $G/D = 0,1$ hingga $G/D = 1$. Penurunan nilai CL_p disebabkan oleh perbedaan tekanan antara upper side dan lower side silinder-1 karena adanya pengaruh lower wall. Perbedaan tekanan antara upper side dan lower side silinder sirkular menjadi lebih kecil seiring dengan variasi G/D semakin besar karena pengaruh blockage yang semakin berkurang. Pengaruh blockage pada CL_p dapat dipahami dari fakta alamiah aliran yang cenderung menghindari hambatan, sehingga laju massa aliran pada sisi bawah silinder sirkular akan lebih rendah dibandingkan sisi atas. Berdasarkan prinsip konservasi energi, kecepatan aliran yang tinggi akan memiliki tekanan yang lebih rendah. Sehingga tekanan

yang lebih tinggi pada sisi bawah akan menghasilkan gaya lift yang positif. Peningkatan G/D menuju 0,2 akan meningkatkan laju massa aliran pada sisi bawah akibat pengaruh blockage yang berkurang, sehingga tekanan pada sisi bawah akan menurun dan menurunkan CL_p .

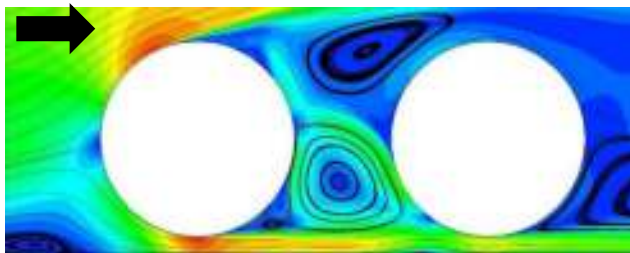


Gambar 4.5 Grafik perbandingan antara CD_p dan CL_p terhadap variasi G/D tanpa kemiringan dinding

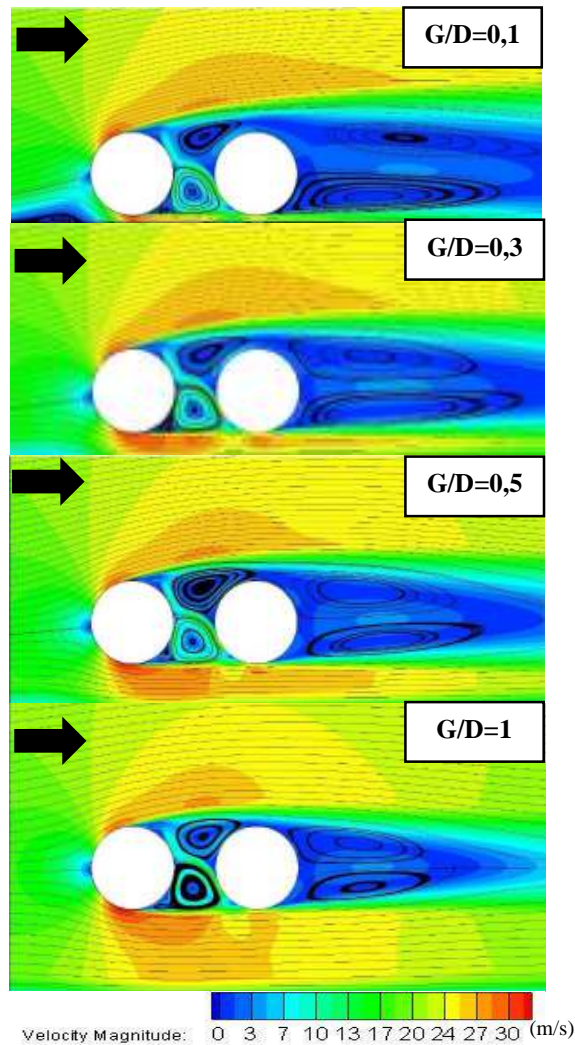
Pada silinder-2, nilai CD_p pada seluruh variasi G/D berharga negatif diakibatkan oleh free shear layer silinder-1 yang melingkupi silinder-2. Nilai CL_p mengalami penurunan nilai dari $G/D = 0,1$ ke $G/D = 0,2$. Hal ini menunjukkan bahwa pada $G/D = 0,2$ blockage berkurang sehingga laju massa aliran di sisi bawah lebih besar mengakibatkan penurunan tekanan dan menurunkan CL_p . Nilai CL_p mengalami peningkatan pada $G/D = 0,3$ hingga $G/D = 1$. Hal tersebut sesuai dengan pembahasan pada C_p silinder-2 bahwa pada lower side silinder peningkatan $G/D > 0,3$ sudah tidak lagi meningkatkan akselerasi. Sehingga CL_p pada $G/D > 0,3$ akan

meningkat karena terjadi peningkatan tekanan. Penurunan dan peningkatan nilai CLp disebabkan oleh perbedaan tekanan antara upper side dan lower side silinder-2 karena adanya pengaruh lower wall.

Perilaku CDp dan CLp pada $G/D = 0,1$ hingga 1 memiliki hubungan yang erat dengan adanya fenomena blockage pada aliran. Blockage adalah fenomena aliran yang terhambat akibat adanya peningkatan tekanan yang dihasilkan dari pelebaran streamtube hal ini digambarkan pada grafik C_p lower wall di rentang $-4 < X/D < -2$. Pada dasarnya aliran tidak suka dihambat, sehingga blockage menyebabkan aliran menuju ke arah upper side silinder sirkular. Akselerasi aliran pada daerah upper side silinder sirkular meningkat jika variasi G/D semakin kecil. Akibatnya terjadi perbedaan tekanan atas dan bawah silinder sirkular. Perbedaan tekanan sisi depan dan belakang silinder sirkular juga terjadi karena adanya pergeseran titik stagnasi di sisi depan silinder dimana peningkatan G/D menyebabkan kenaikan tekanan pada sisi bawah-depan silinder sirkular sehingga titik stagnasi bergeser ke atas. Gambar 4.6 menunjukkan fenomena blockage pada $G/D = 0,1$. Peningkatan G/D menyebabkan efek blockage berkurang sehingga akselerasi aliran simetris pada upper side dan lower side silinder sirkular seperti ditunjukkan pada Gambar 4.7.



Gambar 4.6 Fenomena blockage pada $G/D = 0,1$ tanpa kemiringan dinding ($\alpha = 0^\circ$)



Gambar 4.7 Visualisasi aliran melintasi dua silinder sirkular tiap G/D tanpa kemiringan dinding ($\alpha = 0^\circ$)

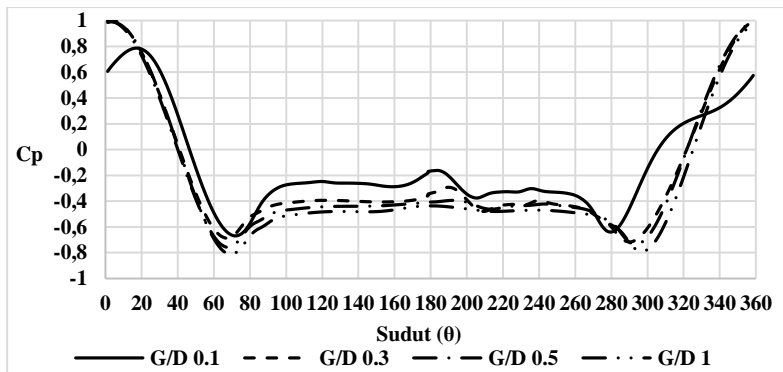
4.2. Pengaruh variasi G/D terhadap karakteristik aliran pada inclined wall angle (α) sebesar 10°

Keberadaan dua silinder sirkular pada variasi G/D sebesar 0,1, 0,3, 0,5, dan 1 dekat dinding miring $\alpha = 10^\circ$ dapat memengaruhi distribusi tekanan pada kedua silinder sirkular tersebut. Fenomena ini dapat dilihat dari pengolahan data secara kualitatif berupa visualisasi aliran yaitu velocity contour, pressure contour, streamline dan data kuantitatif digambarkan dalam sebuah grafik distribusi tekanan masing-masing silinder sirkular dan lower wall. Pada range $0^\circ < \theta < 180^\circ$ menunjukkan sudut posisi upper side dari masing-masing silinder sirkular sedangkan pada range $180^\circ < \theta < 360^\circ$ menunjukkan sudut posisi lower side dari masing-masing silinder sirkular. Peletakan pusat silinder-1 berada pada $X/D = 0$ dan peletakan pusat silinder-2 pada $X/D = 1,5$.

Gambar 4.8 merupakan grafik C_p silinder-1 terhadap variasi G/D. Pengamatan pada distribusi C_p upper side silinder-1 menunjukkan C_p maksimum pada G/D = 0,1 lebih rendah dari G/D lainnya disebabkan oleh posisi titik stagnasi yang berada didalam boundary layer lower wall, sehingga terjadi viscous dissipation yang menyebabkan energi aliran berkurang saat mencapai titik stagnasi. C_p maksimum tersebut meningkat dan bergeser menuju leading edge ($\theta = 0^\circ$) saat G/D ditingkatkan. Pengamatan pada C_p minimum menunjukkan bahwa C_p minimum pada G/D = 0,1 lebih besar dari G/D lainnya. Apabila G/D ditingkatkan maka C_p minimum akan menurun. Hal ini mengindikasikan akselerasi yang semakin besar pada upper side ($60^\circ < \theta < 80^\circ$) ketika G/D ditingkatkan karena adanya pengaruh dari kemiringan dinding.

Pengamatan pada distribusi C_p lower side silinder-1, C_p maksimum pada G/D = 0,1 memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan G/D lainnya. C_p maksimum meningkat dan posisinya bergeser menuju leading edge saat G/D ditingkatkan. Apabila G/D ditingkatkan maka C_p minimum menurun secara signifikan menjadi lebih rendah. Hal ini mengindikasikan bahwa

pengaruh blockage yang berkurang menyebabkan laju massa aliran yang melewati lower side silinder sirkular meningkat. Sehingga, tekanan pada lower side silinder sirkular mengalami penurunan. Hal ini menghasilkan rata-rata tekanan sisi bawah-belakang yang lebih rendah dari G/D lainnya walaupun perlambatan pada $G/D = 0,1$ lebih tinggi. Pengamatan pada grafik C_p silinder-1 menunjukkan bahwa keberadaan silinder-2 memberikan pengaruh terhadap blockage atau hambatan pada sisi celah antar kedua silinder. Hal tersebut terlihat dimana blockage tersebut menimbulkan adanya forward shear layer, yang ditandai dengan grafik C_p yang meningkat pada kisaran sudut $170^\circ < \theta < 190^\circ$.

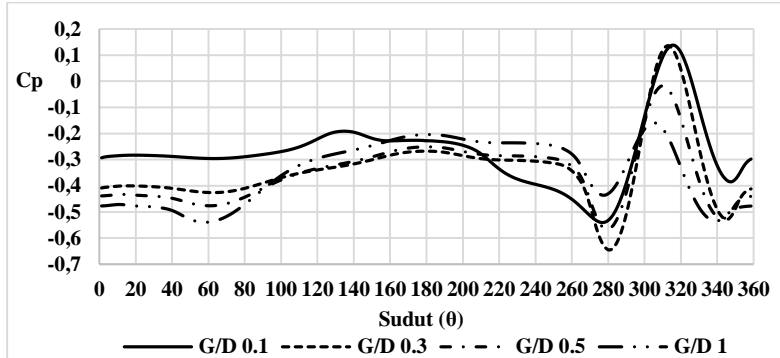


Gambar 4.8 Grafik C_p silinder-1 terhadap variasi G/D pada inclined wall angle (α) = 10°

Gambar 4.9 menunjukkan grafik distribusi tekanan silinder-2. Pengamatan pada upper side silinder menunjukkan bahwa pada seluruh variasi G/D C_p bernilai negatif. Hal ini disebabkan oleh adanya free shear layer silinder-1 yang melingkupi silinder-2. Pengamatan pada lower side silinder-2 menunjukkan adanya peak yang mengindikasikan adanya reattachment yaitu penempelan kembali free shear layer bawah silinder-1 pada bawah-depan silinder-2 pada kisaran ($310^\circ < \theta < 320^\circ$). Pengamatan lebih detail

pada puncak reattachment menunjukkan bahwa peningkatan G/D akan menurunkan puncak reattachment. Penurunan puncak reattachment mengindikasikan adanya pengecilan streamtube pada kisaran ($290^\circ < \theta < 310^\circ$) sehingga terjadi peningkatan akselerasi ketika G/D ditingkatkan karena pengaruh kemiringan dinding.

Pada lower side silinder-2, yaitu pada C_p minimum akan menurun ketika G/D ditingkatkan hingga $G/D = 0,3$. Namun peningkatan G/D lebih lanjut akan meningkatkan nilai C_p minimum. Hal ini mengindikasikan bahwa $G/D = 0,3$ merupakan jarak optimum antara silinder ke lower wall. Akselerasi yang semakin besar pada lower side silinder-2 ($\theta = 280^\circ$) karena blockage yang berangsur menghilang tidak lagi meningkat saat G/D ditingkatkan lebih lanjut ($G/D > 0,3$). Selanjutnya tekanan mulai naik menunjukkan adanya perlambatan, pada $G/D = 1$ memiliki perlambatan paling besar dibanding G/D lainnya. Perlambatan ini menghasilkan rata-rata tekanan sisi bawah belakang ($180^\circ < \theta < 270^\circ$) yang lebih tinggi dari rasio G/D lainnya.

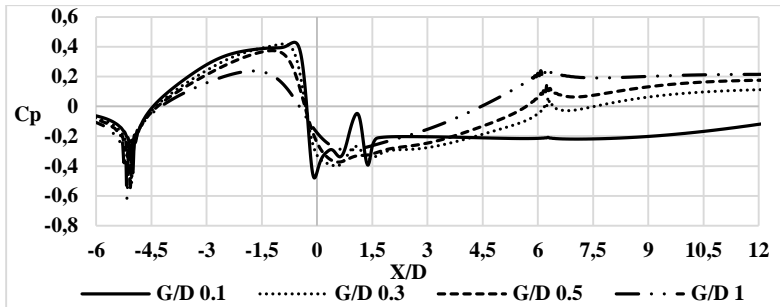


Gambar 4.9 Grafik C_p silinder-2 terhadap variasi G/D pada inclined wall angle (α) = 10°

Tekanan pada lower side silinder sirkular dapat dipengaruhi oleh adanya celah sempit/ jarak gap yang kecil. Untuk mengetahui

pengaruh tersebut, pengolahan data kuantitatif berupa nilai C_p lower wall dapat dibentuk ke dalam grafik. Gambar 4.10 merupakan grafik C_p lower wall terhadap variasi G/D sebesar 0,1, 0,3, 0,5, dan 1 pada inclined wall angle (α) sebesar 10° . Pengamatan pada $X/D = -5$ yaitu titik awal tepi step kemiringan dinding menunjukkan bahwa nilai C_p menurun. Hal ini mengindikasikan adanya perbesaran penampang yang menyebabkan penurunan tekanan akibat adanya adverse pressure gradient ditandai dengan C_p bernilai negatif. Pada ($-4 < X/D < -0,5$) menunjukkan adanya peak dimana pada $G/D = 0,1$ peak yang terbentuk lebih besar dibandingkan G/D lainnya. Peak menurun apabila G/D ditingkatkan. Hal ini mengindikasikan pengaruh blockage yang semakin berkurang ketika G/D ditingkatkan.

Dua tekanan minimum diamati pada grafik C_p lower wall yaitu pada daerah $X/D = 0$ dan $X/D = 1,5$. Daerah ini merupakan pusat celah antara silinder-1 dan silinder-2 terhadap lower wall. C_p minimum pada $G/D = 0,1$ lebih rendah dibandingkan G/D lainnya. Semakin besar G/D , tekanan minimum semakin naik dan bergeser ke belakang mengindikasikan bahwa semakin besar celah maka akselerasi semakin kecil dan akselerasi tidak lagi pada celah yang paling sempit ini menunjukkan vena contracta. Pengamatan pada sisi belakang silinder-2 menunjukkan bahwa pada $G/D = 0,1$ didapati daerah C_p konstan pada rentang $3 < X/D < 7$. Daerah C_p konstan tersebut menghilang saat G/D ditingkatkan lebih lanjut dan berubah menjadi memiliki puncak pada $X/D \approx 7$. Hal ini menunjukkan adanya perlambatan aliran di rentang $3 < X/D < 7$ pada $G/D \geq 0,2$. Nilai puncak meningkat saat G/D ditingkatkan. Tekanan mengalami proses recovery pada daerah setelah $X/D > 20$, dimana tekanan pada lower wall menuju stabil atau konstan. Semakin besar G/D , semakin cepat tekanan mengalami proses recovery.

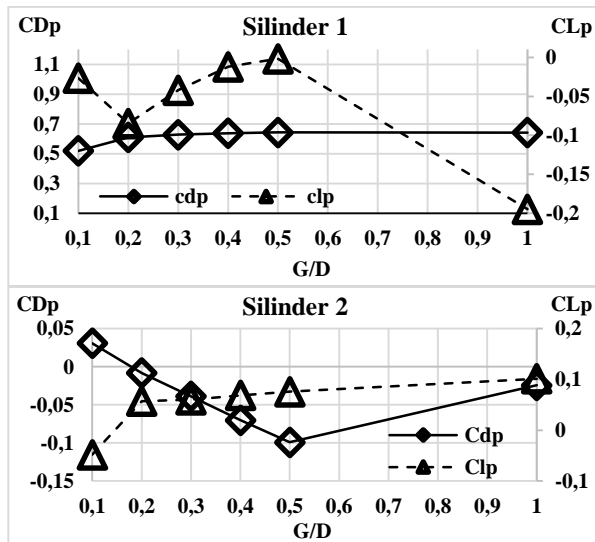


Gambar 4.10 Grafik C_p lower wall terhadap variasi G/D pada inclined wall angle (α) = 10°

Gambar 4.11 merupakan grafik perbandingan antara CD_p dan CL_p terhadap variasi G/D pada inclined wall angle ($\alpha = 10^\circ$) pada silinder-1 dan silinder-2. Pada silinder-1 nilai CD_p pada $G/D = 0,1$ memiliki nilai yang lebih rendah dari G/D lainnya. CD_p meningkat secara konsisten saat G/D ditingkatkan. Saat $G/D = 0,1$ ditingkatkan menuju 0,2 maka CL_p menurun secara signifikan. Peningkatan G/D menuju 0,3 akan meningkatkan CL_p . Peningkatan lebih lanjut akan menghasilkan CL_p yang cenderung naik lalu turun kembali. Seluruh CL_p bernilai negatif pada tiap G/D , sehingga dapat disimpulkan bahwa peletakan silinder sirkular pada dinding miring akan menghasilkan gaya lift negatif atau downforce. Gaya lift negatif akan mengurangi beban pada tumpuan. Namun secara fisik silinder sirkular akan mengalami gaya yang lebih besar. Gaya lift negatif disebabkan oleh rata-rata tekanan sisi bawah yang lebih rendah dibandingkan sisi atas. Rendahnya C_p pada sisi bawah menunjukkan adanya akselerasi aliran yang tinggi pada sisi bawah.

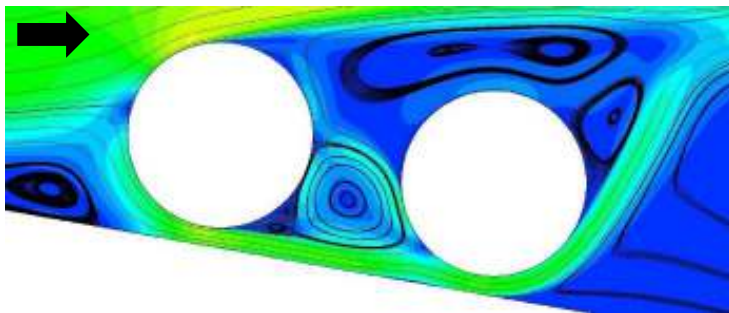
Pengamatan pada nilai CD_p dan CL_p silinder-2 menunjukkan bahwa nilai CD_p cenderung menurun ketika G/D ditingkatkan. Dimana nilai CD_p bernilai negatif karena wake silinder-1 melingkupi silinder-2. Namun nilai CD_p pada $G/D = 0,1$ bernilai positif. Hal ini mengindikasikan adanya aliran yang

berbelok ke sisi atas pada downstream silinder-2 sehingga tekanan downstream lebih rendah dari tekanan upstream mengakibatkan CD_p menekan ke belakang. Nilai CL_p cenderung naik ketika G/D ditingkatkan dan CL_p bernilai positif pada variasi G/D kecuali pada $G/D = 0,1$ CL_p bernilai negatif. CL_p negatif diakibatkan oleh adanya akselerasi aliran yang berbelok di sisi bawah silinder-2 sehingga menurunkan tekanan sisi bawah dan menekan silinder-2 kebawah. Nilai CL_p mengalami peningkatan nilai dari $G/D = 0,3$ ke $G/D = 1$. Hal tersebut sesuai dengan pembahasan pada C_p silinder-2 bahwa pada lower side silinder-2 peningkatan $G/D > 0,3$ sudah tidak lagi meningkatkan akselerasi. Sehingga CL_p pada $G/D > 0,3$ akan meningkat karena terjadi peningkatan tekanan. Penurunan dan peningkatan nilai CL_p disebabkan oleh perbedaan tekanan antara upper side dan lower side silinder-2 karena adanya pengaruh lower wall.

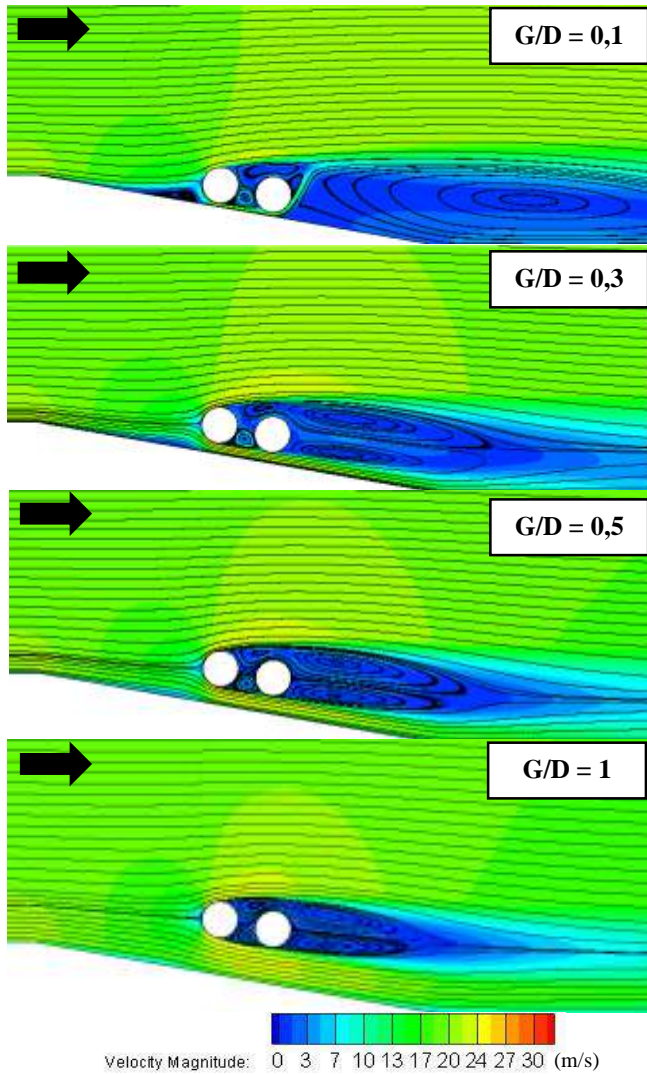


Gambar 4.11 Grafik perbandingan antara CD_p dan CL_p terhadap variasi G/D pada inclined wall angle (α) = 10°

Perilaku dari CDP dan CLp pada $\alpha = 10^\circ$ dipengaruhi oleh fenomena blockage dan adverse pressure gradient. Blockage kuat berupa wake pada $G/D = 0,1$ menurunkan rata-rata tekanan bawah-depan silinder-1 namun peningkatan G/D sudah tidak lagi menurunkan CDP karena adanya faktor kemiringan dinding mengubah karakteristik CDP dan CLp secara signifikan dengan memberikan adverse pressure gradient pada aliran. Adverse pressure gradient mengurangi momentum aliran upstream, sehingga aliran akan cenderung membentuk wake yang lebih besar. Wake yang lebih besar menunjukkan pengaruh blockage yang lebih besar sehingga menyebabkan laju massa aliran berbelok menuju sisi atas downstream silinder-2. Pembelokan aliran tersebut menghasilkan aliran sekunder pada sisi downstream silinder-2. Aliran sekunder memengaruhi karakteristik aliran dengan berperilaku sebagai blockage pada sisi downstream ditunjukkan dengan adanya pelebaran streamtube pada $G/D = 0,1$ saat aliran sisi bawah melintas dekat aliran sekunder. Blockage yang besar dan aliran sekunder pada $G/D = 0,1$ ditunjukkan pada Gambar 4.12.



Gambar 4.12 Fenomena blockage dan aliran sekunder pada $G/D = 0,1$ pada inclined wall angle (α) = 10°



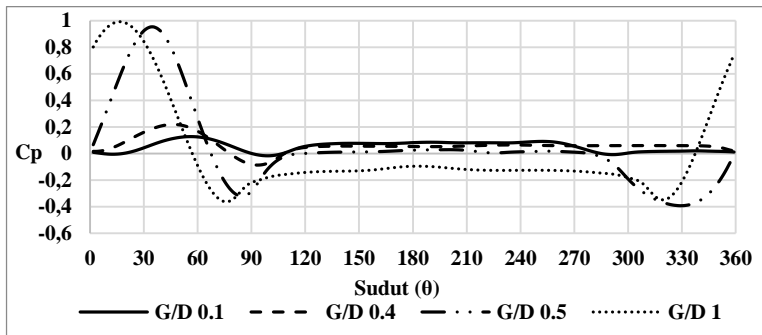
Gambar 4. 13 Visualisasi aliran melintasi dua silinder sirkular tiap G/D pada inclined wall angle (α) = 10°

Peningkatan G/D menuju 0,2 mengurangi pengaruh blockage dan meningkatkan laju massa aliran sisi bawah, sehingga menghasilkan momentum aliran yang cukup besar untuk melawan pengaruh aliran sekunder. Akselerasi yang besar di sisi bawah akan menurunkan tekanan dan CL_p juga menurun. Blockage yang berkurang menyebabkan kenaikan tekanan pada sisi bawah-depan silinder-1 sehingga meningkatkan CD_p . Penurunan CD_p dan peningkatan CL_p pada $G/D = 0,2$ pada silinder-2 disebabkan oleh hilangnya aliran sekunder, sehingga CD_p menurun dan bernilai negatif. Namun adanya adverse pressure gradient dari dinding menyebabkan rata-rata tekanan pada sisi bawah-belakang meningkat sehingga CL_p juga meningkat. Peningkatan G/D lebih lanjut menghasilkan CD_p dan CL_p yang relatif konstan. Hal ini menunjukkan bahwa pengaruh dinding menurun seperti yang ditunjukkan oleh distribusi C_p dinding yang relatif tidak berbeda pada $G/D \geq 0,2$ dan ditunjukkan oleh visualisasi aliran pada Gambar 4.13.

4.3. Pengaruh variasi G/D terhadap karakteristik aliran pada inclined wall angle (α) sebesar 20°

Keberadaan dua silinder sirkular di dekat dinding dengan kemiringan yang semakin besar dapat memengaruhi distribusi tekanan pada kedua silinder sirkular tersebut. Fenomena ini dapat dilihat dari pengolahan data secara kualitatif berupa visualisasi aliran yaitu velocity contour, pressure contour dan streamline dan data kuantitatif digambarkan dalam sebuah grafik distribusi tekanan kedua silinder sirkular dan lower wall. Pada range $0^\circ < \theta < 180^\circ$ menunjukkan sudut posisi upper side dari masing-masing silinder sirkular sedangkan pada range $180^\circ < \theta < 360^\circ$ menunjukkan sudut posisi lower side dari masing-masing silinder sirkular. Peletakan pusat silinder-1 berada pada $X/D = 0$ dan peletakan pusat silinder-2 pada $X/D = 1,5$.

Gambar 4.14 merupakan grafik distribusi tekanan (C_p) silinder-1 terhadap variasi G/D sebesar 0,1, 0,4, 0,5, dan 1 pada inclined wall angle (α) = 20°. Pengamatan pada distribusi C_p upper side dan lower side silinder-1 menunjukkan bahwa nilai C_p pada $G/D \leq 0,4$ mendekati nol menunjukkan bahwa nilai tekanan wall silinder-1 mendekati sama dengan tekanan statis. Hal ini mengindikasikan bahwa pada $G/D = 0,1$ hingga 0,4 silinder-1 sepenuhnya terlingkup dalam recirculation zone akibat wake step dari kemiringan dinding. Semakin besar G/D , semakin besar fluktuasi grafik distribusi C_p . Hal ini menjelaskan bahwa semakin besar G/D divariasikan, pengaruh keberadaan lower wall semakin kecil sehingga silinder sirkular keluar dari lingkup recirculation zone.



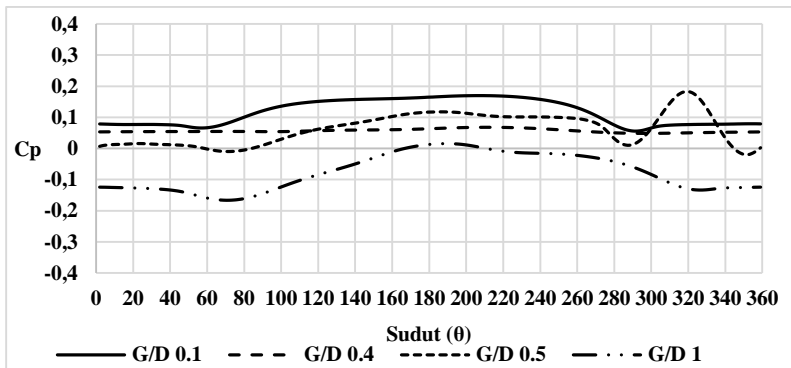
Gambar 4.12 Grafik C_p silinder-1 terhadap variasi G/D pada inclined wall angle (α) = 20°

Pada $G/D = 0,5$ dan 1 kedua silinder sirkular telah keluar dari daerah resirkulasi ditunjukkan dengan grafik yang menunjukkan C_p maksimum. C_p maksimum pada upper side silinder-1 menunjukkan bahwa peningkatan G/D dari 0,5 menuju 1 akan meningkatkan C_p maksimum. Namun titik stagnasi masih dalam boundary layer lower wall sehingga terdapat viscous dissipation akibatnya nilai C_p maksimum tidak tepat di $C_p = 1$.

Pengamatan pada C_p minimum di upper side silinder-1 menunjukkan bahwa peningkatan G/D dari 0,5 menuju 1 akan menurunkan C_p minimum dan bergeser menuju leading edge. Hal ini menunjukkan bahwa pada $G/D = 1$ terjadi akselerasi aliran yang lebih tinggi dan lebih cepat mencapai kecepatan maksimum. Akselerasi aliran yang lebih tinggi tersebut menghasilkan rata-rata tekanan sisi atas-belakang ($90^\circ < \theta < 180^\circ$) yang lebih rendah. Pengamatan pada titik separasi pada upper side dan lower side silinder-1 menunjukkan bahwa peningkatan G/D dari 0,5 menuju 1 akan menggeser titik separasi pada upper side dan lower side silinder-1 menuju leading edge. Pengamatan lain pada distribusi C_p lower side silinder-1 menunjukkan bahwa C_p minimum pada $G/D = 0,5$ sama dengan $G/D = 1$. Aliran mengalami perlambatan yang lebih tinggi pada $G/D = 0,5$ dibandingkan $G/D = 1$. Perlambatan yang lebih tinggi tersebut menghasilkan rata-rata tekanan sisi atas-belakang ($90^\circ < \theta < 180^\circ$) yang lebih besar.

Gambar 4.15 merupakan grafik C_p silinder-2 terhadap variasi G/D sebesar 0,1, 0,4, 0,5, dan 1 pada inclined wall angle (α) = 20° . Pengamatan pada distribusi C_p upper side dan lower side silinder-2 menunjukan bahwa nilai C_p pada $G/D \leq 0,4$ mendekati nol menunjukkan bahwa tekanan wall silinder-2 mendekati sama dengan tekanan statis. Hal ini mengindikasikan bahwa pada $G/D = 0,1$ hingga 0,4 silinder-2 sepenuhnya terlingkup dalam recirculation zone akibat wake step dari kemiringan dinding. Pengamatan pada $G/D = 0,5$ menunjukkan bahwa pada lower side silinder-2 terbentuk peak pada ($310^\circ < \theta < 325^\circ$) mengindikasikan adanya reattachment (penempelan kembali free shear layer) dari free shear layer yang terseparasi pada lower side silinder-1. Separasi aliran terjadi pada lower side silinder-2 yaitu pada $\theta = 270^\circ$. Pada $G/D = 0,5$ terbentuk aliran sekunder di belakang wake silinder-2. Hal ini terjadi karena jarak antara silinder dengan lower wall sempit sehingga laju massa aliran di sisi bawah tidak mampu melawan wake yang besar sehingga aliran di lower side terhambat dan berbelok ke sisi atas. Ketika variasi G/D ditingkatkan menuju

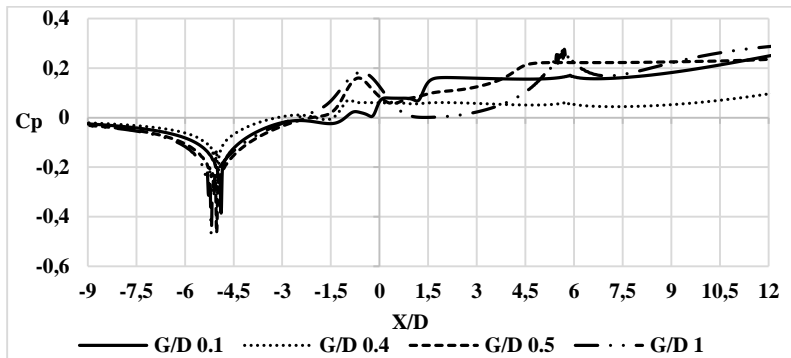
$G/D = 1$ laju massa aliran yang mengalir di sisi lower side mampu melawan wake sehingga aliran sekunder tidak terbentuk. Pengamatan pada grafik C_p upper side dan lower side silinder-2 bernilai negatif. Hal ini mengindikasikan bahwa keseluruhan silinder-2 terlingkup oleh free shear layer berupa wake dari separasi upper side dan lower side silinder-1 dan tidak terjadi reattachment pada lower side silinder-2. Pengamatan ini dapat dilihat pada visualisasi aliran pada Gambar 4.19.



Gambar 4.13 Grafik C_p silinder-2 terhadap variasi G/D pada inclined wall angle (α) = 20°

Tekanan pada lower side silinder sirkular dapat dipengaruhi oleh adanya celah sempit/ jarak gap yang kecil. Untuk mengetahui pengaruh tersebut, pengolahan data kuantitatif berupa nilai C_p lower wall dapat dibentuk ke dalam grafik. Gambar 4.16 merupakan grafik C_p lower wall terhadap variasi G/D sebesar 0,1, 0,4, 0,5, dan 1 pada inclined wall angle (α) = 20° . Pengamatan pada $X/D = -5$ titik awal tepi step kemiringan dinding terlihat bahwa trendline C_p menurun. Hal ini mengindikasikan adanya perbesaran penampang menyebabkan tekanan turun karena adanya adverse pressure gradient ditandai dengan C_p bernilai negatif.

Pada grafik tidak menunjukkan adanya peak sebelum $X/D = 0$, ini menunjukkan tidak adanya blockage sebelum memasuki celah silinder-1 dan grafik juga tidak menunjukkan penurunan nilai C_p pada $X/D = 0$ dan 1,5 karena kedua silinder berada dalam recirculation zone akibat inclined wall. Pada $G/D = 0,1$ terdapat daerah C_p yang relatif konstan pada rentang $2 < X/D < 8$. Peningkatan lebih lanjut akan menghilangkan daerah C_p konstan dan distribusi C_p memiliki puncak pada $X/D \approx 5$ yaitu pada variasi $G/D = 1$. Tekanan mengalami proses recovery pada daerah $X/D > 20$, dimana tekanan pada lower wall menuju stabil atau konstan. Semakin besar variasi G/D , semakin cepat aliran mengalami proses recovery.

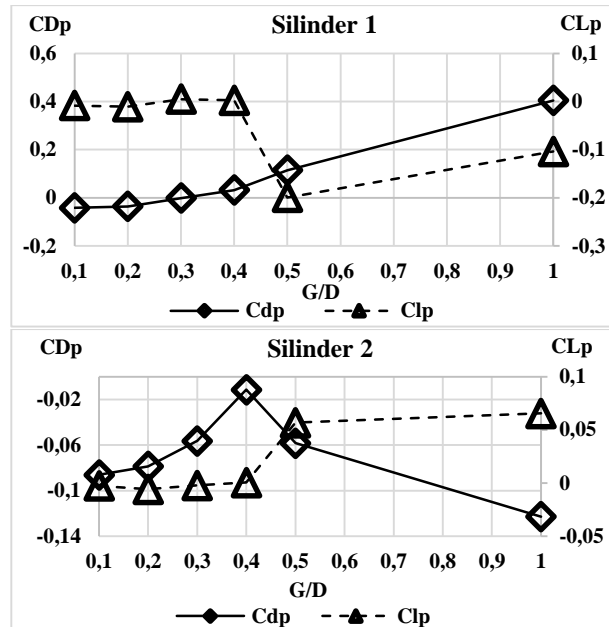


Gambar 4.14 Grafik C_p lower wall terhadap variasi G/D pada inclined wall angle (α) = 20°

Gambar 4.17 merupakan grafik perbandingan antara CD_p dan CL_p terhadap variasi G/D pada inclined wall angle ($\alpha = 20^\circ$) pada silinder-1 dan silinder-2. Pada silinder-1 CD_p bernilai negatif relatif konstan pada $G/D \leq 0,2$. CD_p akan bernilai positif dan meningkat secara konsisten apabila G/D diperbesar menuju $G/D \geq 0,4$. Nilai CL_p pada $G/D \leq 0,4$ memiliki nilai yang relatif konstan, namun peningkatan G/D menuju 0,5 akan menurunkan CL_p secara

drastis. Peningkatan G/D menuju 1 akan meningkatkan CL_p kembali. Nilai CL_p memiliki nilai negatif kecuali pada $G/D = 0,3$ dan $0,4$ bernilai positif. CL_p bernilai negatif pada G/D semakin besar disebabkan oleh laju massa aliran yang lebih besar sehingga akselerasi tinggi di sisi bawah. Akselerasi yang tinggi menyebabkan tekanan C_p yang rendah sehingga tekanan tinggi di sisi atas menekan silinder ke bawah.

Perilaku dari CD_p dan CL_p pada variasi $\alpha = 20^\circ$ memiliki persamaan dengan variasi $\alpha = 10^\circ$. Namun kemiringan dinding yang lebih curam menyebabkan kedua silinder sirkular terendam dalam daerah resirkulasi dari dinding pada $G/D \leq 0,4$. Hal ini menyebabkan distribusi C_p kedua silinder sirkular mendekati 0, sehingga CD_p dan CL_p pada kedua silinder sirkular memiliki nilai yang relatif konstan. Nilai CD_p negatif pada $G/D \leq 0,4$ disebabkan oleh silinder-1 yang terendam dalam daerah resirkulasi. Sedangkan pada $G/D = 0,4$ walaupun silinder sirkular tampak terendam dalam daerah resirkulasi namun silinder sirkular sudah mulai mengalami interaksi dengan free shear layer dinding. Interaksi tersebut ditunjukkan oleh CD_p yang meningkat. Namun interaksi tersebut tidak cukup besar untuk memengaruhi CL_p . Peningkatan G/D menuju $0,5$ mengeluarkan silinder sirkular dari daerah resirkulasi yang ditunjukkan oleh distribusi C_p silinder sirkular yang berbeda secara signifikan dari $G/D \leq 0,4$. Peninjauan nilai CD_p dilakukan dan menghasilkan trendline naik pada $G/D = 0,1$ hingga 1. Hal ini disebabkan oleh tekanan pada sisi depan silinder-1 semakin besar seiring dengan semakin besar variasi G/D . Tekanan yang besar pada sisi bawah depan silinder-1 diakibatkan oleh penurunan blockage.

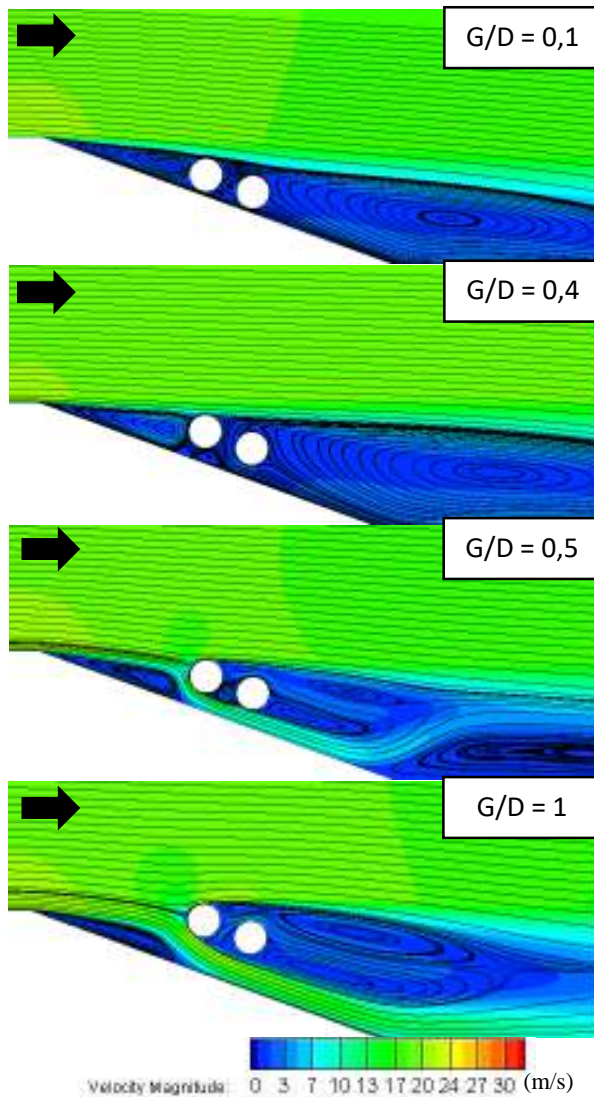


Gambar 4.15 Grafik perbandingan antara CDp dan CLp terhadap variasi G/D pada inclined wall angle (α) = 20°

Pada silinder-2 nilai CDp pada seluruh variasi G/D bernilai negatif. Hal ini menunjukkan bahwa silinder-2 berada dalam recirculation zone pada $G/D \leq 0,4$ dan silinder-2 dilingkupi free shear layer silinder-1 pada $G/D \geq 0,4$. Namun trendline CDp cenderung naik pada $G/D = 0,1$ hingga 0,4. Peningkatan G/D lebih lanjut akan menurunkan nilai CDp. Peningkatan nilai CDp hingga $G/D = 0,4$ diakibatkan oleh adanya arus balik aliran di depan silinder-2 pada $G/D = 0,4$ sesuai dengan visualisasi aliran pada Gambar 4.18. Arus balik aliran menyebabkan tekanan depan silinder-2 meningkat sehingga CDp juga meningkat. Peningkatan G/D lebih lanjut akan menurunkan nilai CDp pada $G/D = 0,5$

karena terdapat aliran sekunder di belakang wake silinder-2 sehingga sisi depan dan belakang silinder-2 tetap dilingkupi oleh wake sehingga nilai CD_p menurun. Peningkatan menuju $G/D = 1$ akan menurunkan CD_p karena seluruh silinder-2 dilingkupi oleh free shear layer silinder-1 sehingga perbedaan tekanan depan dan belakang menurun dan menurunkan CD_p . Nilai CL_p silinder-2 bernilai negatif pada $G/D = 0,1$ hingga $0,3$ dimana nilai CL_p cenderung konstan hingga $G/D = 0,4$. Nilai CL_p negatif menunjukkan bahwa silinder-2 dilingkupi recirculation zone. Peningkatan G/D lebih lanjut akan meningkatkan nilai CL_p dan CL_p bernilai positif. Hal ini mengindikasikan bahwa peningkatan G/D menyebabkan silinder sirkular keluar dari daerah resirkulasi namun tetap berada dalam lingkupan wake silinder-1 sehingga memiliki perbedaan tekanan antara upper side dan lower side silinder-2. CL_p berharga positif menunjukkan bahwa tekanan pada lower side silinder sirkular lebih besar dari tekanan upperside sehingga memberi gaya angkat menjauhi lower wall.

Visualisasi aliran ditunjukkan pada Gambar 4.18 bahwa pada $G/D = 0,5$ aliran sekunder terbentuk pada downstream silinder-2 namun pada jarak yang relatif jauh, sehingga berbeda dengan pembahasan pada variasi $\alpha = 10^\circ$ bahwa pada $G/D = 0,5$ CD_p silinder-2 masih bernilai negatif karena terlingkupi wake silinder-1 dan CL_p bernilai positif. Peningkatan G/D menuju 1 akan menghilangkan aliran sekunder di downstream silinder-2, adanya adverse pressure gradient meningkatkan tekanan sisi bawah-belakang sehingga CL_p silinder-2 meningkat. Semakin besar G/D , semakin kecil pengaruh wake akibat inclined wall. Pada $G/D = 0,1$ hingga $0,4$, aliran yang mengalir pada lower side silinder sirkular merupakan aliran arus balik yang diakibatkan oleh wake inclined wall. Pada $G/D = 0,5$ hingga 1, aliran yang mengalir merupakan aliran arus masuk dari inlet. Hal ini dapat terjadi dikarenakan G/D yang semakin besar, sisi celah antara silinder sirkular dan lower wall semakin besar sehingga momentum aliran inlet lebih besar sehingga mampu melawan aliran sekunder.

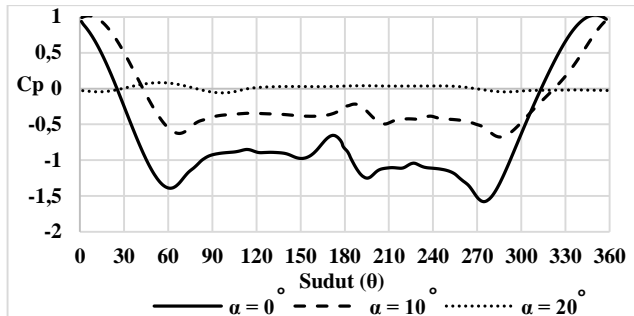


Gambar 4.16 Visualisasi aliran melintasi dua silinder sirkular tiap G/D pada inclined wall angle (α) = 20°

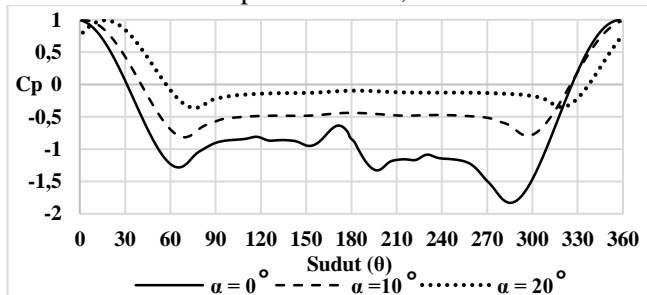
4.4 Pengaruh variasi inclined wall angle (α) terhadap karakteristik aliran pada $G/D = 0,2$ dan $G/D = 1$

Pembahasan mengenai pengaruh variasi kemiringan dinding (α) terhadap $G/D = 0,2$ dan 1 dibahas pada sub-bab berikut. Perbandingan awal dilakukan pada $G/D = 0,2$ dengan variasi α . Gambar 4.19 menunjukkan grafik distribusi C_p silinder-1 dengan variasi inclined wall angle (α). Pada upper side ($0^\circ < \theta < 180^\circ$) dan lower side ($180^\circ < \theta < 360^\circ$) silinder-1, peningkatan α secara umum akan menurunkan C_p maksimum dan menggeser posisinya menuju trailing edge. Sedangkan C_p minimum akan meningkat dan bergeser menuju trailing edge dengan grafik yang lebih simetris. Perbedaan terlihat pada $\alpha = 20^\circ$ menunjukkan grafik yang konstan dengan nilai C_p mendekati nol. Hal ini mengindikasikan bahwa pada $\alpha = 20^\circ$ dengan $G/D = 0,2$ silinder-1 terendam dalam daerah resirkulasi sehingga tekanan wall silinder-1 sebanding dengan tekanan free stream. Pengamatan grafik pada daerah ($160^\circ < \theta < 200^\circ$) menunjukkan adanya puncak, peningkatan α akan menggeser C_p menuju leading edge dan meningkatkan nilai C_p menuju nol dengan grafik yang lebih landai.

Peningkatan G/D menuju 1 seperti pada Gambar 4.20 menunjukkan trendline grafik yang hampir sama pada seluruh variasi α , dimana peningkatan α akan menunjukkan grafik yang semakin simetris antara upper side dan lower side silinder-1. Semakin besar inclined wall angle (α), maka nilai C_p silinder-1 semakin mendekati tekanan statis.



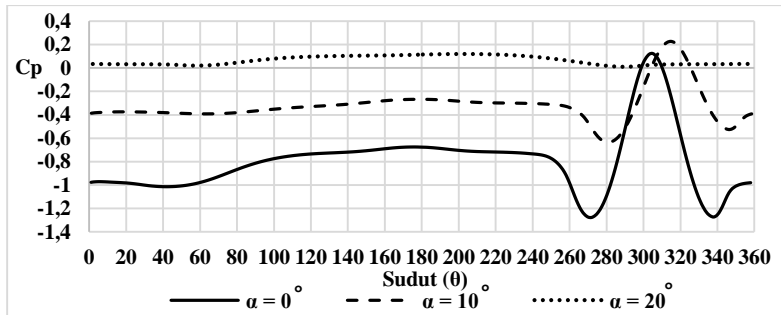
Gambar 4.17 Grafik distribusi C_p Silinder-1 setiap variasi α pada $G/D = 0,2$



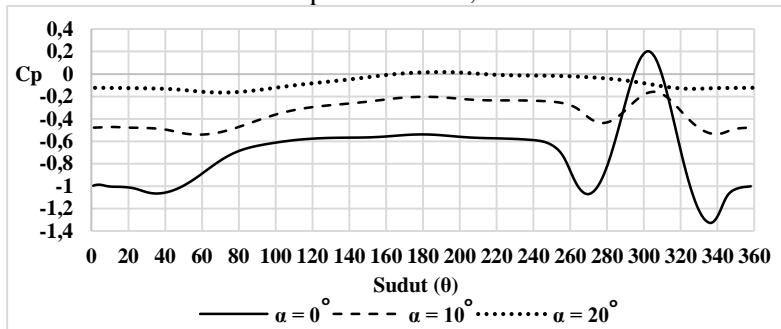
Gambar 4.18 Grafik distribusi C_p Silinder-1 setiap variasi α pada $G/D = 1$

Gambar 4.21 merupakan grafik C_p silinder-2 dengan variasi inclined wall angle (α) pada $G/D = 0,2$. Pengamatan pada puncak reattachment menunjukkan, peningkatan α menyebabkan puncak reattachment menjadi landai. Pada $\alpha = 20^\circ$ tidak terdapat puncak reattachment. Hal ini diakibatkan adanya kemiringan dinding yang curam sehingga kedua silinder terendam dalam daerah resirkulasi. Serta peningkatan α akan meningkatkan nilai C_p minimum pada lower side silinder-2. Hal ini mengindikasikan bahwa $\alpha = 0^\circ$ memiliki akselerasi yang lebih tinggi dibandingkan α lainnya. Pada upper side silinder ($0^\circ < \theta < 180^\circ$) menunjukkan nilai

C_p yang negatif akibat free shear layer silinder-1 melingkupi silinder-2. Peningkatan G/D menuju 1 pada Gambar 4.22 menunjukkan peningkatan α menyebabkan puncak reattachment semakin landai dan bernilai negatif. Hal ini mengindikasikan bahwa sekitar $300^\circ < \theta < 320^\circ$ terjadi penyempitan streamtube singga terjadi penurunan C_p . Pengamatan pada $\alpha = 20^\circ$ menunjukkan nilai C_p mendekati nol, hal ini mengindikasikan bahwa pada $G/D = 1$ tidak terjadi reattachment pada lower side silinder-2 akibat dari keseluruhan silinder-2 dilingkupi oleh wake silinder-1.

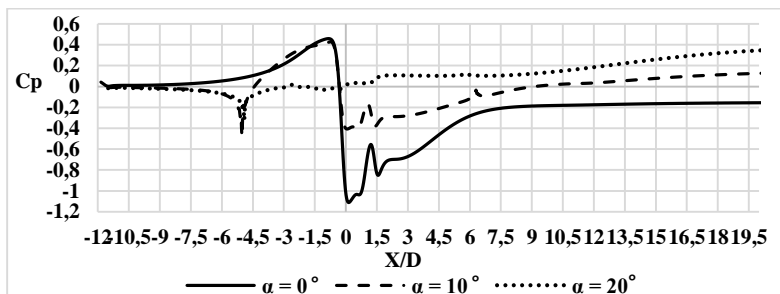


Gambar 4.19 Grafik distribusi C_p Silinder-2 setiap variasi α pada $G/D = 0,2$

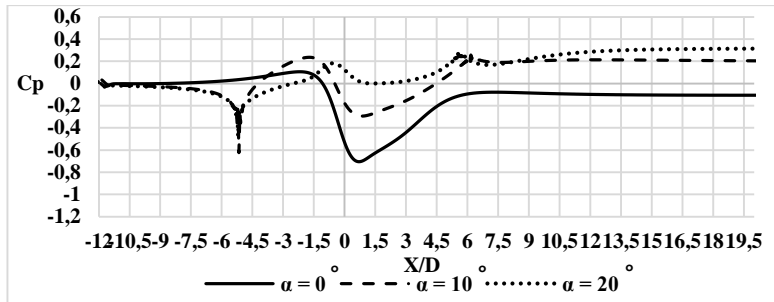


Gambar 4.20 Grafik distribusi C_p Silinder-2 setiap variasi α pada $G/D = 1$

Pengamatan C_p lower wall dengan variasi α pada $G/D = 0,2$ ditunjukkan pada Gambar 4.23. Pada daerah $-12 < X/D < -5$ terjadi penurunan tekanan yaitu pada inclined wall angle (α) = 10° dan 20° . Dimana $X/D = -5$ merupakan titik awal tepi step kemiringan dinding. Pada daerah $-5 < X/D < -1$ terjadi peningkatan nilai C_p lower wall. Semakin besar inclined wall angle (α) semakin kecil peningkatan nilai C_p lower wall. Hal ini terjadi karena pada $\alpha = 20^\circ$ tidak terbentuk blockage pada sisi depan silinder-1 melainkan terbentuk recirculation zone akibat kemiringan dinding yang curam. Penurunan nilai C_p lower wall terjadi pada daerah $X/D = 0$ dan $1,5$. Semakin besar inclined wall angle, kedua penurunan nilai C_p lower wall tidak signifikan. Pada daerah $0 < X/D < 12$, tekanan pada lower wall meningkat. Hal ini akibat adanya pelebaran streamtube lower wall pada daerah tersebut, mengakibatkan aliran mengalami perlambatan. Semakin besar α , semakin lama proses recovery terjadi. Peningkatan G/D menuju 1 pada Gambar 4.24 terdapat perbedaan karakteristik aliran, yaitu peak yang terbentuk semakin kecil hal ini menunjukkan pada G/D yang besar, blockage di sisi depan silinder-1 semakin berkurang. C_p minimum akan meningkat dan bergeser ke belakang, hal ini menunjukkan bahwa semakin besar celah maka akselerasi semakin kecil dan akselerasi maksimum tidak lagi pada celah yang paling sempit ini menunjukkan vena contracta.



Gambar 4.21 Grafik distribusi C_p lower wall setiap variasi α pada $G/D = 0,2$

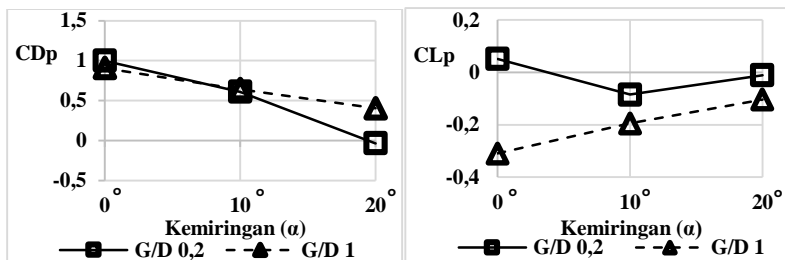


Gambar 4.22 Grafik distribusi C_p lower wall setiap variasi α pada $G/D = 1$

Pengaruh inclined wall angle (α) terhadap CD_p dan CL_p silinder-1 pada $G/D = 0,2$ dan $G/D = 1$ ditunjukkan oleh Gambar 4.25. Pada grafik CD_p menunjukkan bahwa nilai CD_p konsisten menurun apabila α ditingkatkan. Hal ini mengindikasikan bahwa peningkatan α seiring dengan peningkatan blockage. Pengaruh blockage tersebut dilihat dari besarnya wake pada sisi depan silinder-1. Besarnya blockage akan menurunkan rata-rata tekanan sisi bawah-depan ($270^\circ < \theta < 360^\circ$) dan mengurangi CD_p . Pada $\alpha = 20^\circ$ penurunan CD_p bernilai negatif pada $G/D = 0,2$ karena silinder-1 berada dalam daerah resirkulasi. Dapat disimpulkan bahwa pengaruh daerah resirkulasi pada silinder-1 dengan $G/D = 0,2$ akan mengurangi nilai CD_p sebesar 100% dari nilai CD_p tanpa kemiringan dinding. Peningkatan G/D menuju 1 akan menghilangkan blockage pada $\alpha = 0^\circ$ dan $\alpha = 10^\circ$, sehingga penurunan CD_p pada $\alpha = 10^\circ$ lebih disebabkan oleh rata-rata C_p sisi bawah belakang ($180^\circ < \theta < 270^\circ$) yang meningkat akibat adverse pressure gradient, sehingga menurunkan rata-rata tekanan sisi bawah depan silinder-1 dan CD_p menurun. Pada $\alpha = 20^\circ$ silinder-1 telah keluar dari daerah resirkulasi namun terdapat blockage yang besar di sisi depan bawah silinder-1 sehingga nilai CD_p menurun. Dapat disimpulkan bahwa pengaruh blockage

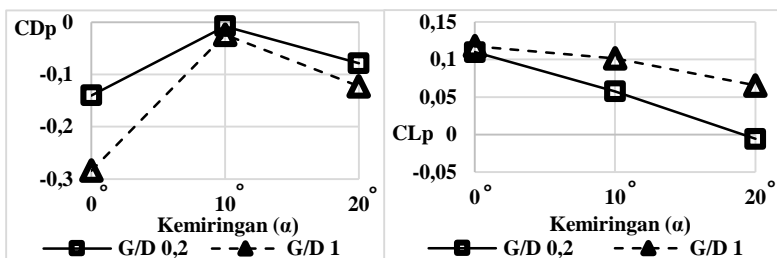
yang besar di depan silinder-1 pada $G/D = 1$ akan mengurangi nilai CD_p sebesar 50% dari nilai CD_p tanpa kemiringan dinding

Sedangkan pada Grafik CL_p dipengaruhi oleh karakteristik aliran pada sisi bawah yang berbeda setiap variasi α . Grafik pada $G/D = 0,2$ dengan $\alpha = 10^\circ$ memiliki nilai CL_p minimum disebabkan akselerasi yang besar di sisi bawah sehingga menurunkan CL_p . Peningkatan $\alpha = 20^\circ$ silinder sirkular berada didalam daerah resirkulasi dari dinding, sehingga perbedaan tekanan antara sisi atas dan bawah silinder tidak cukup besar untuk menghasilkan gaya lift. Ketika G/D ditingkatkan menuju 1 maka terjadi perubahan drastis pada karakteristik aliran yang menghasilkan perbedaan tekanan antara sisi atas dan bawah yang signifikan dibandingkan $G/D = 0,2$. Peningkatan α pada $G/D = 1$ akan meningkatkan nilai CL_p meskipun tetap bernilai negatif. Hal ini diakibatkan karena akselerasi aliran yang signifikan pada sisi bawah, namun akselerasi aliran di sisi bawah akan berkurang karena pada α yang semakin besar terdapat blockage yang semakin besar pula di sisi bawah depan silinder-1. Akselerasi yang berkurang inilah yang mengakibatkan tekanan di sisi bawah silinder sirkular naik sehingga CL_p meningkat. Dapat disimpulkan bahwa peningkatan kemiringan dinding pada silinder-1 akan mengurangi beban pada tumpuan dengan menurunkan nilai CL_p menjadi negatif.



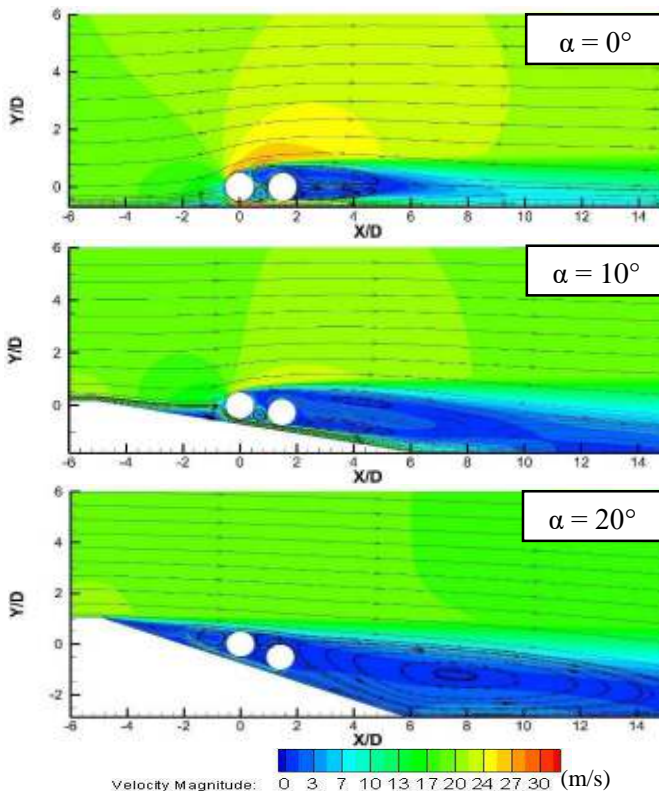
Gambar 4.23 Grafik CD_p dan CL_p Silinder-1 tiap variasi α pada $G/D = 0,2$ dan 1

Pengaruh inclined wall angle (α) terhadap CD_p dan CL_p silinder-2 ditunjukkan pada Gambar 4.26. Grafik CD_p pada $G/D = 0,2$ dan 1 menunjukkan peningkatan α memberikan CD_p maksimum pada $\alpha = 10^\circ$ dengan keseluruhan CD_p bernilai negatif karena silinder-2 terendam dalam daerah resirkulasi. Pada $\alpha = 10^\circ$ peningkatan CD_p disebabkan oleh rata-rata C_p sisi bawah belakang yang meningkat akibat adverse pressure gradient sehingga tekanan pada sisi bawah depan silinder-2 akan menurun namun penurunan nilai C_p tetap lebih besar dari C_p pada $\alpha = 0^\circ$ ($270^\circ < \theta < 360^\circ$) sesuai dengan grafik C_p silinder-2. Hal ini menyebabkan tekanan sisi depan silinder meningkat dan meningkatkan nilai CD_p . Penurunan nilai CD_p pada $\alpha = 20^\circ$ diakibatkan silinder-2 sepenuhnya berada dalam daerah resirkulasi. Pembahasan pada grafik CL_p , peningkatan α akan menurunkan nilai CL_p secara konsisten. Dimana nilai CL_p terendah pada $\alpha = 20^\circ$. Hal ini mengindikasikan bahwa peningkatan α akan menurunkan tekanan pada lower side silinder-2. Tekanan yang rendah pada lower side silinder-2 disebabkan karena silinder berada di daerah resirkulasi pada $G/D = 0,2$ sedangkan pada $G/D = 1$ keseluruhan silinder dilingkupi oleh wake silinder-1, sehingga perbedaan tekanan atas dan bawah silinder-2 tidak cukup untuk menghasilkan gaya lift. Hal ini menyebabkan tekanan pada lower side silinder-2 menurun dan menurunkan CL_p .



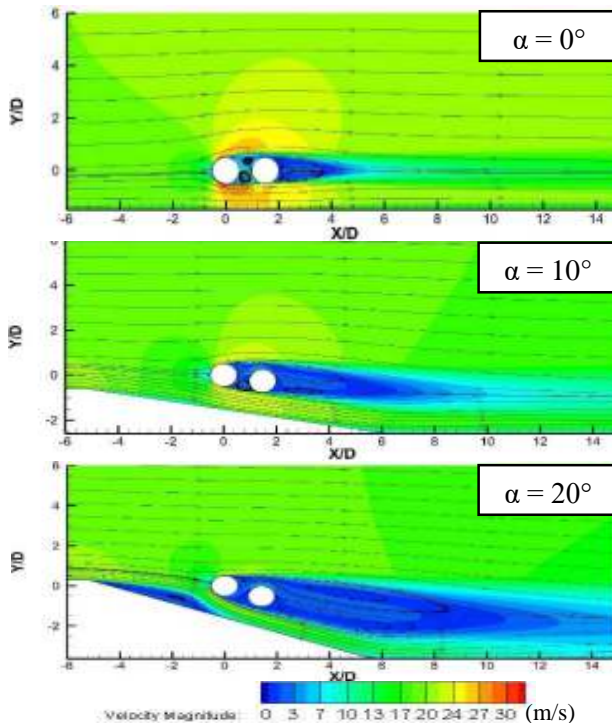
Gambar 4.24 CD_p dan CL_p Silinder-2 tiap variasi α pada $G/D = 0,2$ dan 1

Visualisasi aliran pada Gambar 4.27 dengan $G/D = 0,2$ menunjukkan peningkatan α akan memperbesar blockage pada $\alpha = 10^\circ$ dan membentuk wake step pada $\alpha = 20^\circ$ sehingga dengan jarak celah yang kecil antara silinder dengan lower wall, kedua silinder sirkular akan terendam dalam recirculation zone. Recirculation zone merupakan daerah arus balik aliran yang ditandai dengan arah kecepatan yang berlawanan dengan kecepatan masuk (ke arah sumbu-x negatif).



Gambar 4.25 Visualisasi aliran melintasi dua silinder sirkular tiap variasi α pada $G/D = 0,2$

Peningkatan G/D menuju 1 pada Gambar 4.28 menunjukkan bahwa celah yang besar antara silinder sirkular dengan lower wall akan menghilangkan blockage di sisi depan silinder-1 pada $\alpha = 0^\circ$ dan 10° , namun pada $\alpha = 20^\circ$ blockage yang besar di depan bawah silinder-1 tetap terbentuk. Pengaruh blockage yang berkurang akan meningkatkan laju massa aliran pada lower side silinder sirkular. Hal ini meningkatkan momentum pada lower side silinder sehingga peningkatan α sudah tidak lagi membentuk daerah resirkulasi karena momentum lebih mampu melawan aliran sekunder.



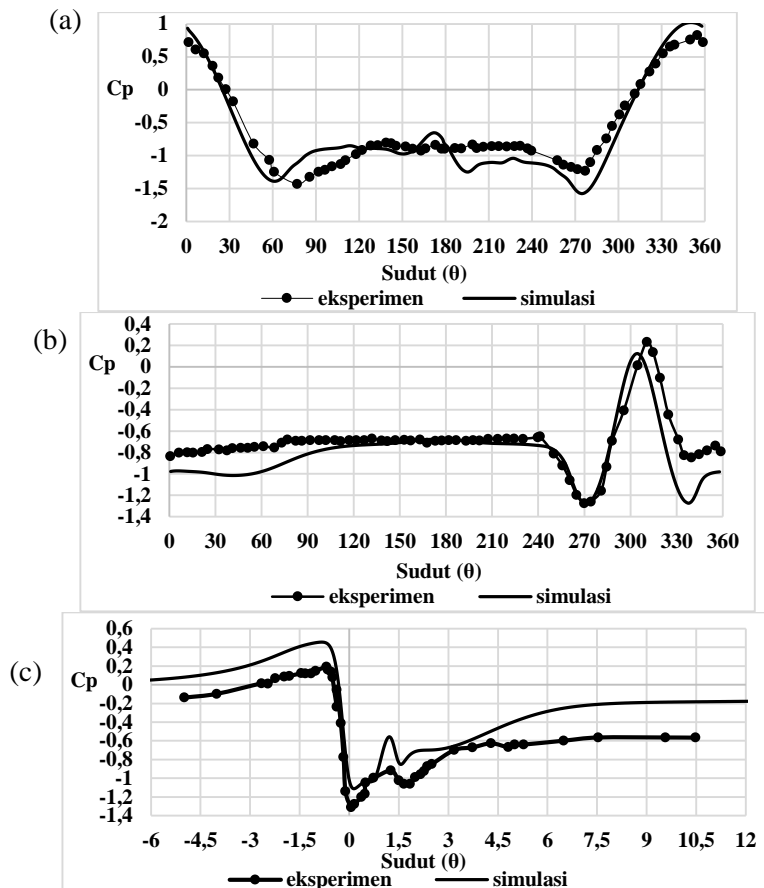
Gambar 4.26 Visualisasi aliran melintasi dua silinder sirkular tiap variasi α pada $G/D = 1$

4.5 Diskusi

Pembahasan diskusi diawali dengan membandingkan hasil data kuantitatif berupa grafik C_p kedua silinder sirkular dan lower wall secara simulasi numerik dengan hasil eksperimen terdahulu oleh (Triyogi et al., 2010) pada $G/D = 0,2$ dan tanpa kemiringan dinding ($\alpha = 0^\circ$). Gambar 4.29 (a) menunjukkan grafik C_p silinder-1 pada $G/D = 0,2$. Didapat hasil simulasi numerik tidak terlalu sesuai dengan eksperimen. Perbedaan terdapat pada penurunan C_p minimum dimana pada eksperimen menunjukkan akselerasi yang besar pada upper side silinder-1 sedangkan pada simulasi numerik didapat akselerasi yang lebih besar pada lower side silinder-1. Namun grafik menunjukkan nilai C_p minimum pada upper side silinder-1 yang hampir sama antara simulasi dengan eksperimen.

Gambar 4.29 (b) menunjukkan grafik C_p silinder-2 pada $G/D = 0,2$. Grafik memberikan hasil perbandingan dengan kesepakatan yang baik pada simulasi dan eksperimen. Kesepakatan yang baik ditunjukkan dengan treadline yang sama pada upper side silinder yaitu CD_p bernilai negatif. Pada lower side silinder-2 juga terbentuk puncak reattachment yang relatif sama, penurunan nilai C_p minimum juga dengan nilai yang sama pada hasil simulasi dan eksperimen. Perbandingan grafik lower wall ditunjukkan pada Gambar 4.29 (c). Grafik menunjukkan kesepakatan yang baik pada hasil simulasi dan eksperimen. Namun secara keseluruhan hasil simulasi memiliki nilai C_p yang relatif lebih tinggi dibanding nilai C_p pada eksperimen.

Diskusi diakhiri dengan menganalisis pengaruh jarak celah (G/D) dan inclined wall angle (α) pada karakteristik aliran secara kuantitatif yaitu pengolahan data CD_p dan CL_p . Gambar 4.30 menunjukkan trendline CD_p dan CL_p silinder-1 terhadap variasi G/D dan α .



Gambar 4.27 Perbandingan grafik C_p simulasi numerik dengan eksperimen (Triyogi et al., 2010) pada $G/D = 0,2$; (a) Silinder-1, (b) Silinder-2 dan (c) Lower wall tanpa kemiringan dinding

Pada $\alpha = 0^\circ$ nilai CD_p silinder-1 naik pada $G/D = 0,1$ menuju 0,2 lalu grafik mulai turun dengan konstan pada $G/D = 0,3$ hingga $G/D = 1$. Penurunan grafik yang konstan mengindikasikan bahwa pada $\alpha = 0^\circ$, perbedaan tekanan antara depan dan belakang silinder-1 relatif kecil karena hanya dipengaruhi blockage. Pada $\alpha = 10^\circ$, nilai CD_p silinder-1 cenderung naik pada $G/D = 0,1$ menuju 0,2, lalu peningkatan G/D lebih lanjut menunjukkan peningkatan grafik yang konstan hingga $G/D = 1$.

Trendline grafik tersebut mengindikasikan adanya pengaruh adverse pressure gradient akibat kemiringan dinding sehingga terdapat perbedaan tekanan depan dan belakang silinder-1 relatif besar namun perbedaan tekanan di setiap G/D relatif konstan karena pada $G/D = 0,4$ hingga 1 blockage di depan silinder-1 sudah hilang. Pada $\alpha = 20^\circ$, nilai CD_p silinder-1 cenderung konstan dan bernilai negatif pada $G/D = 0,1$ hingga 0,3 karena keberadaan silinder-1 dalam wake step akibat inclined wall, lalu trendline grafik CD_p terus naik dan bernilai positif pada $G/D = 0,4$ hingga 1 karena jarak yang semakin jauh dengan dinding sehingga silinder-1 keluar dari daerah resirkulasi. Hal ini membuktikan bahwa semakin besar α dan G/D , trendline nilai CD_p silinder-1 akan mengalami peningkatan.

Peninjauan berdasarkan variasi α pada setiap G/D , maka semakin besar α , semakin kecil nilai CD_p silinder-1. Hal ini disebabkan oleh keberadaan silinder-1 dalam lingkup wake step akibat inclined wall pada α yang besar. Keberadaan silinder sirkular pada daerah resirkulasi memengaruhi tekanan pada silinder sirkular, sehingga terjadi perbedaan tekanan antara sisi depan dan belakang silinder sirkular yang semakin kecil seiring dengan kemiringan yang semakin besar. Pengamatan lebih lanjut dapat disimpulkan bahwa peningkatan α pada $G/D = 0,1$ menunjukkan penurunan nilai CD_p sebesar 100% dari CD_p tanpa kemiringan dinding karena pengaruh daerah resirkulasi pada $\alpha = 20^\circ$, sedangkan pada $G/D = 1$ penurunan nilai CD_p sebesar 50%

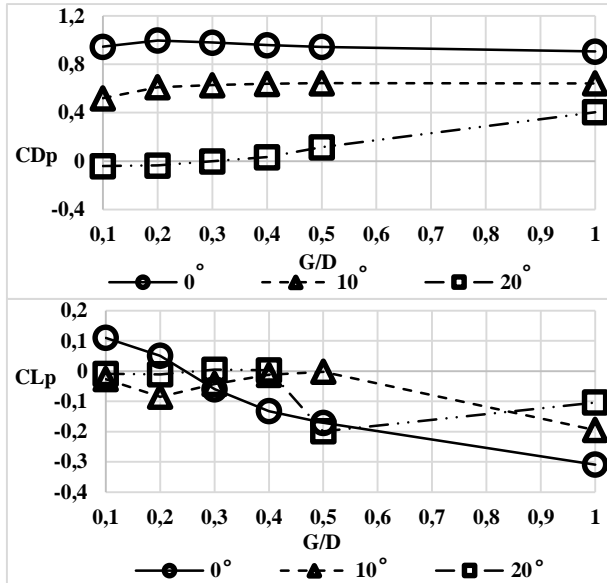
karena pada gap yang besar silinder telah keluar daerah resirkulasi namun tetap ada pengaruh blockage.

Pembahasan pada grafik CLp Gambar 4.30 menunjukkan pada $\alpha = 0^\circ$, nilai CLp silinder-1 terus menurun pada $G/D = 0,1$ hingga 1 karena tidak adanya pengaruh kemiringan dinding sehingga perbedaan tekanan lower side dan upper side silinder-1 hanya diakibatkan oleh blockage yang semakin kecil pada G/D yang semakin besar. Pada $\alpha = 10^\circ$, nilai CLp silinder sirkular turun pada $G/D = 0,1$ hingga 0,2 lalu grafik naik hingga $G/D = 0,5$ dan turun kembali pada $G/D = 1$. Trendline grafik yang fluktuatif diakibatkan adanya pengaruh kemiringan dinding. Pada $\alpha = 20^\circ$, nilai CLp silinder-1 cenderung konstan pada $G/D = 0,1$ hingga 0,4 hal ini menunjukkan silinder-1 berada dalam wake step akibat inclined wall, lalu grafik turun pada $G/D = 0,5$ karena adanya laju massa aliran di sisi bawah sehingga akselerasi aliran naik dan tekanan menurun, selanjutnya grafik naik kembali pada $G/D = 1$. Secara garis besar, semakin besar G/D dan α maka trendline CLp silinder-1 mengalami penurunan.

Peninjauan berdasarkan variasi α pada setiap G/D , maka semakin besar α akan semakin kecil nilai CLp silinder-1. Hal ini disebabkan oleh keberadaan silinder-1 dalam lingkup wake step akibat inclined wall. Keberadaan silinder sirkular pada daerah resirkulasi memengaruhi tekanan pada silinder sirkular, sehingga terjadi perbedaan tekanan antara upper side dan lower side silinder sirkular dimana tekanan upper side lebih besar sehingga menekan silinder-1 ke lower wall.

Gambar 4.32 menunjukkan trendline CDp dan CLp silinder-2 terhadap variasi G/D dan α . Pada $\alpha = 0^\circ$ CDp silinder-2 turun pada $G/D = 0,1$ hingga 1 dengan CDp bernilai negatif karena free shear layer silinder-1 melingkupi silinder-2. Pada $\alpha = 10^\circ$, nilai CDp silinder sirkular turun pada $G/D = 0,1$ hingga 0,5 lalu naik pada $G/D = 1$. Seluruh CDp bernilai negatif kecuali pada $G/D = 0,1$ bernilai positif disebabkan adanya aliran yang berbelok ke sisi atas di belakang silinder-2. Pada $\alpha = 20^\circ$, nilai CDp silinder sirkular

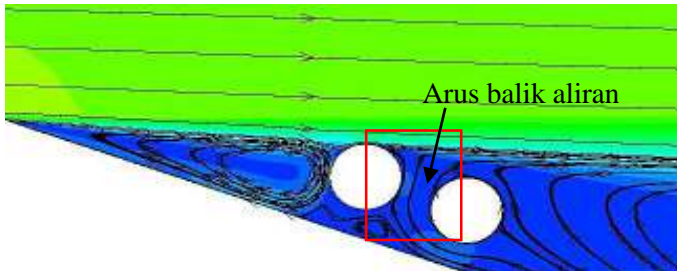
naik pada $G/D = 0,1$ hingga $0,4$ lalu turun pada $G/D = 0,5$ hingga 1 dan seluruh CD_p bernilai negatif. Hal ini membuktikan bahwa semakin besar α dan G/D , trendline nilai CD_p silinder-2 akan mengalami penurunan.



Gambar 4.28 Grafik Perbandingan nilai CD_p dan CL_p pada silinder-1 terhadap variasi G/D dan $\alpha = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$

Peninjauan berdasarkan variasi α pada setiap G/D , pada umumnya $\alpha = 10^\circ$ memiliki nilai CD_p paling tinggi dibandingkan α lainnya. Hal ini disebabkan oleh keberadaan silinder-2 dalam lingkup free shear layer silinder-1 namun adanya adverse pressure gradient meningkatkan tekanan sehingga CD_p meningkat. Keberadaan silinder-2 pada $\alpha = 20^\circ$ sepenuhnya dilingkupi oleh wake step akibat inclined wall. Daerah resirkulasi memengaruhi tekanan pada silinder-2, sehingga terjadi perbedaan tekanan antara sisi depan dan belakang silinder-2 yang semakin kecil. Oleh karena

itulah peningkatan α dari 0° menuju 10° akan meningkatkan CDp namun peningkatan $\alpha = 10^\circ$ menuju 20° akan menurunkan nilai CDp meskipun pada seluruh variasi α bernilai negatif. Namun pada $G/D = 0,4$ menunjukkan adanya perbedaan yaitu pada $\alpha = 20^\circ$ memiliki nilai CDp paling besar. Hal ini dapat ditunjukkan pada zoom-in visualisasi aliran Gambar 4.31.

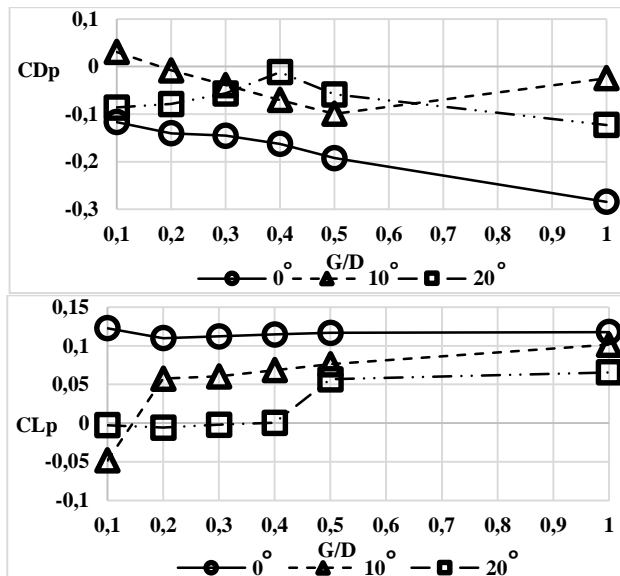


Gambar 4. 29 Zoom-in fenomena arus balik aliran di depan silinder-2 pada $G/D = 0,4$ dengan kemiringan dinding ($\alpha = 20^\circ$)

Pada sisi depan silinder-2 terjadi arus balik aliran dari aliran di belakang silinder-2. Sehingga tekanan di depan silinder-2 akan naik dan meningkatkan nilai CDp meskipun CDp tetap bernilai negatif. Sehingga dapat disimpulkan dari grafik secara keseluruhan bahwa peningkatan α akan meningkatkan nilai CDp meskipun tetap bernilai negatif. Sehingga pengaruh wake silinder-1 yang melingkupi silinder-2 lebih besar dalam menurunkan tekanan pada silinder-2 dari pada pengaruh daerah resirkulasi.

Pembahasan pada grafik CLp silinder-2 Gambar 4.32 menunjukkan pada $\alpha = 0^\circ$, nilai CLp silinder-2 cenderung turun pada $G/D = 0,1$ hingga $0,2$ lalu meningkat secara konstan pada $G/D = 0,3$ hingga 1 . Pada $\alpha = 10^\circ$, nilai CLp silinder-2 terus naik pada $G/D = 0,1$ hingga 1 namun pada $G/D = 0,1$ menunjukkan nilai CLp negatif karena adanya akselerasi aliran di sisi bawah yang berbelok ke sisi atas di belakang silinder-2. Pada $\alpha = 20^\circ$, nilai CLp silinder-2 cenderung konstan pada $G/D = 0,1$ hingga $0,4$ karena silinder

berada dalam daerah resirkulasi, lalu nilai CL_p naik secara konstan pada $G/D = 0,5$ hingga 1 karena pada gap tersebut silinder telah keluar daerah resirkulasi. Secara garis besar, semakin besar G/D dan α , semakin naik trendline grafik CL_p silinder-2. Hal ini disebabkan oleh adanya pengaruh adverse pressure gradient pada silinder sirkular yaitu meningkatkan tekanan sisi bawah-belakang silinder-2, sehingga terjadi perbedaan tekanan antara upper side dan lower side silinder sirkular yang semakin besar seiring dengan kemiringan yang semakin besar. Peninjauan berdasarkan variasi α pada setiap G/D menunjukkan bahwa peningkatan α akan menurunkan nilai CL_p silinder-2. Hal ini disebabkan oleh keberadaan silinder-2 dalam free shear layer silinder-1 pada $\alpha = 0^\circ$ dan 10° dan keberadaan silinder-2 dalam wake step akibat inclined wall pada $\alpha = 20^\circ$.



Gambar 4. 30 Grafik Perbandingan nilai CD_p dan CL_p pada silinder-2 terhadap variasi G/D dan $\alpha = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi numerik pada karakteristik aliran melintasi dua silinder sirkular dekat dinding miring yang divariasikan pada rasio G/D dari 0,1, 0,2 0,3, 0,4, 0,5, dan 1, serta kemiringan dinding dari $\alpha = 0^\circ$, $\alpha = 10^\circ$, dan $\alpha = 20^\circ$ dapat disimpulkan:

1. Secara kualitatif, peningkatan G/D akan mengurangi efek blockage pada sisi depan silinder-1. Blockage yang berkurang menyebabkan laju massa aliran di sisi celah bertambah sehingga akselerasi aliran akan semakin tinggi di sisi bawah kedua silinder. Secara kuantitatif, peningkatan jarak celah (G/D) dan inclined wall angle (α) umumnya akan meningkatkan trendline CDp dan menurunkan trendline CLp pada silinder-1 dan menurunkan trendline CDp, serta meningkatkan trendline CLp pada silinder-2.
 - a. Pada $\alpha=0^\circ$, Peningkatan G/D akan menurunkan CDp dan CLp pada silinder-1. CDp turun (dan bernilai negatif) dan CLp naik pada silinder-2.
 - b. Pada $\alpha=10^\circ$, Peningkatan G/D akan meningkatkan CDp, CLp relatif naik turun (dan bernilai negatif) pada silinder-1. Sedangkan CDp turun (dan bernilai negatif) serta CLp naik pada silinder-2.
 - c. Pada $\alpha=20^\circ$, Peningkatan G/D akan meningkatkan CDp dan menurunkan CLp (konstan menurun pada $G/D \leq 0,4$) pada silinder-1. Sedangkan CDp konstan pada G/D 0,1-0,4 dan menurun pada $G/D \geq 0,5$, CLp naik (konstan naik pada $G/D \leq 0,4$) pada silinder-2.

2. Secara kualitatif, peningkatan inclined wall angle (α) akan membentuk recirculation zone akibat wake step dari kemiringan dinding. Pada kemiringan 0° dan 10° free shear layer silinder-1 melingkupi silinder-2 namun pada kemiringan 20° keseluruhan silinder dilingkupi oleh wake akibat inclined wall. Secara kuantitatif, peningkatan α pada setiap variasi G/D akan menurunkan nilai CDp dan CLp secara konsisten pada silinder-1 dan meningkatkan CDp namun tetap bernilai negatif serta menurunkan nilai CLp pada silinder-2.

5.2 Saran

Penelitian simulasi numerik ini masih merupakan tahap studi awal. Oleh karena itu saran yang dapat diberikan penulis untuk referensi tugas akhir berikutnya sebagai berikut:

1. Penelitian lebih lanjut dibutuhkan simulasi unsteady flow, untuk mengetahui adanya fenomena vortex shedding pada sisi belakang silinder sirkular.
2. Perlu adanya data eksperimental pada kemiringan dinding yang mendukung hasil dari tugas akhir ini sebagai validasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Anderson, John D. 2011. **Fundamentals of Aerodynamics**. New York: McGraw Hills.
- Bearman, P.W., Zdravkovich, M.M., May 1978. "Flow Around a Circular Cylinder near a Plane Boundary". **Journal of Fluid Mechanics** 89, 33-47.
- Choi, J.H., and Lee, S.J., January 2000. "Ground Effect of Flow Around an Elliptic Cylinder in a Turbulent Boundary layer". **Journal of Fluids and Structures** 14, 697-709.
- Louda, Petr, Jaromír Příhoda, Karel Kozel dan Petr Sváček. 2013. "Numerical simulation of flows over 2D and 3D backwardfacing inclined steps". **International Journal of Heat and Fluid Flow** 43 (2013) 268-276.
- Pritchard, Philip J. 2011. **Fox and McDonald's Introduction to Fluid Mechanics**. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Ruck, B., Makiola., B., 1984. "Flow Separation over the Inclined Step". **Notes on Numerical Fluid Mechanics** 40, 47-55.
- Triyogi Yuwono, Fahmi Fahreza and Wawan Aries Widodo 2010. "Flow around two circular cylinders in tandem arrangement near a plane wall". **Regional Conference on Mechanical and Aerospace Technology** Bali, February 9 – 10, 2010.
- Versteeg, H.K., Malalasekera, W. 2007. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics**. Essex: Pearson.
- Wauran, Ursula Angelica. 2018. "Karakteristik aliran melintasi silinder sirkular tunggal dekat inclined wall". Tugas Akhir ITS.
- Widodo, Wawan A. 2010. "Pemodelan Numerik Aliran Melintasi Dua Silinder Sirkular Tersusun Tandem dengan Pengaruh Side Wall dengan Jarak Gap ($G/D = 0.2$)". **Prosiding Seminar Nasional Perkembangan Riset dan Teknologi di Bidang Industri ke 16**. ISBN: 978-979-95620-6-7.

BIODATA PENULIS



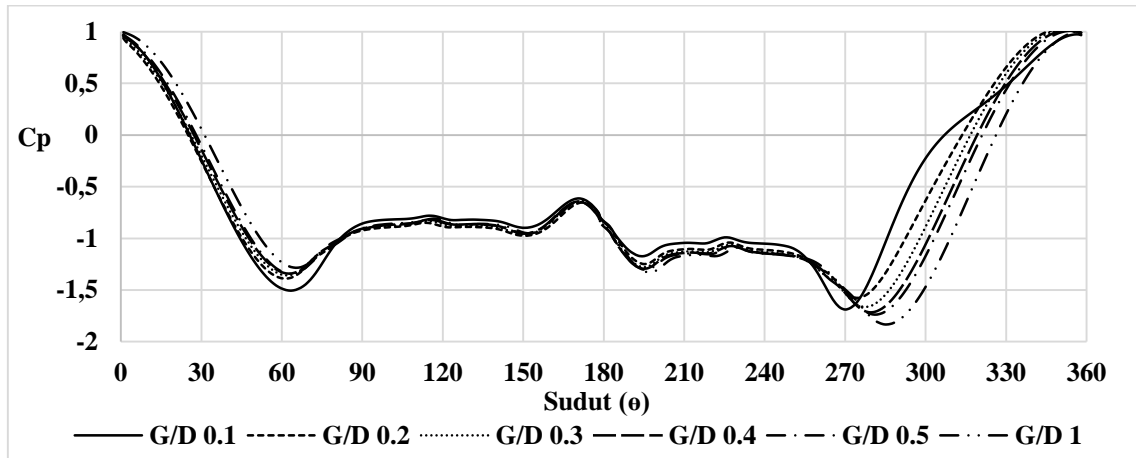
Rida Arifah dilahirkan di Sidoarjo, 28 April 1996. Penulis merupakan anak kedua dari tiga bersaudara. Orang tua penulis bernama Moch Machfud dan Nunung Rosida. Riwayat pendidikan penulis sekolah menengah atas di SMAN 1 Kediri pada tahun 2012-2015. Selanjutnya penulis melanjutkan pendidikan kuliah dengan jurusan S-1 Teknik Mesin di Institut Teknologi

Sepuluh Nopember, Surabaya. Penulis aktif dalam kegiatan akademik maupun nonakademik selama perkuliahan. Penulis mengikuti kegiatan nonakademik berupa Indonesian Corrosion Association ITS Student Chapter dengan jabatan Head of Eksternal Public Relation pada tahun 2016-2017 serta member Society of Petroleum Engineers ITS Student Chapter pada tahun 2015-2016 dan aktif mengikuti kegiatan kepanitian. Penulis juga melakukan kegiatan akademik berupa asisten dosen mata kuliah perpindahan panas dan asisten praktikum lab mekanika fluida. Untuk semua informasi dan masukan terkait tugas akhir dapat menghubungi penulis melalui rida_arifah@yahoo.co.id.

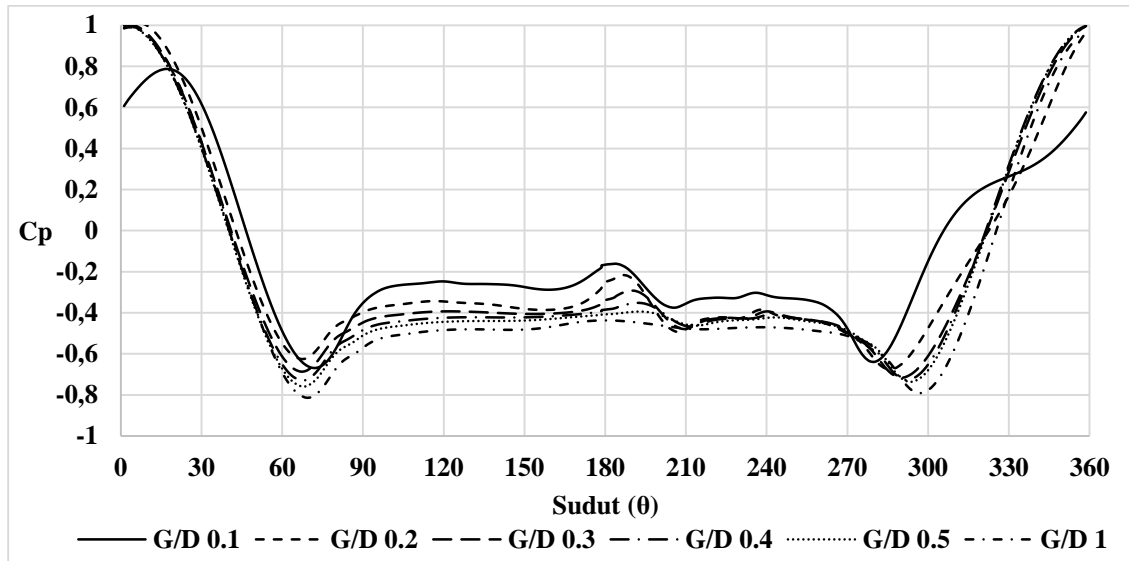
LAMPIRAN A

GRAFIK SILINDER-1

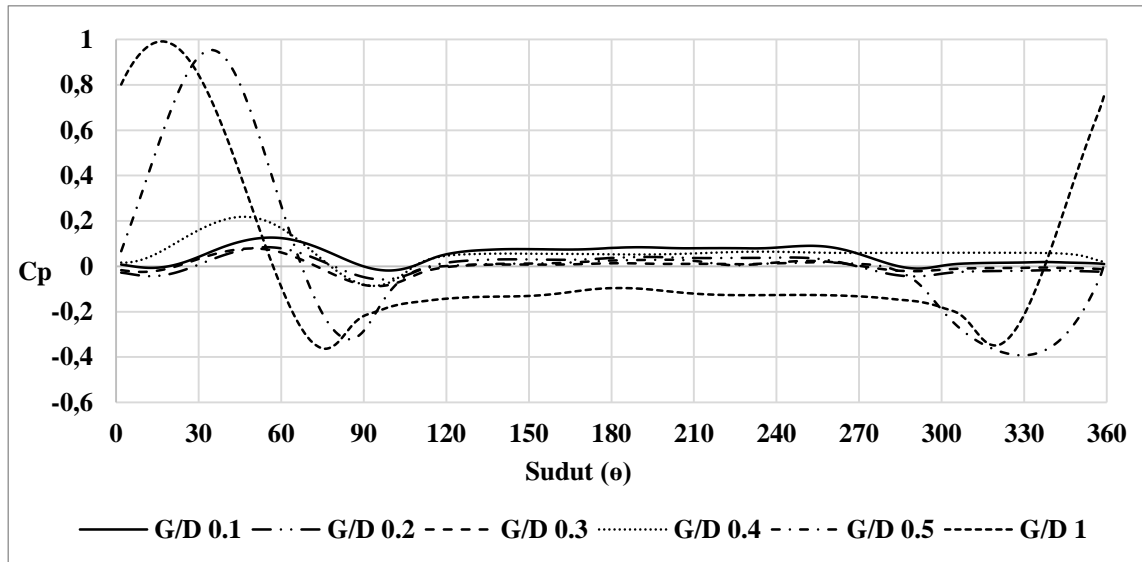
1. Grafik Nilai C_p wall silinder sirkular-1 terhadap variasi G/D pada variasi inclined wall angle (α) sebesar 0°



2. Grafik Nilai C_p wall silinder sirkular-1 terhadap variasi G/D pada variasi inclined wall angle (α) sebesar 10°



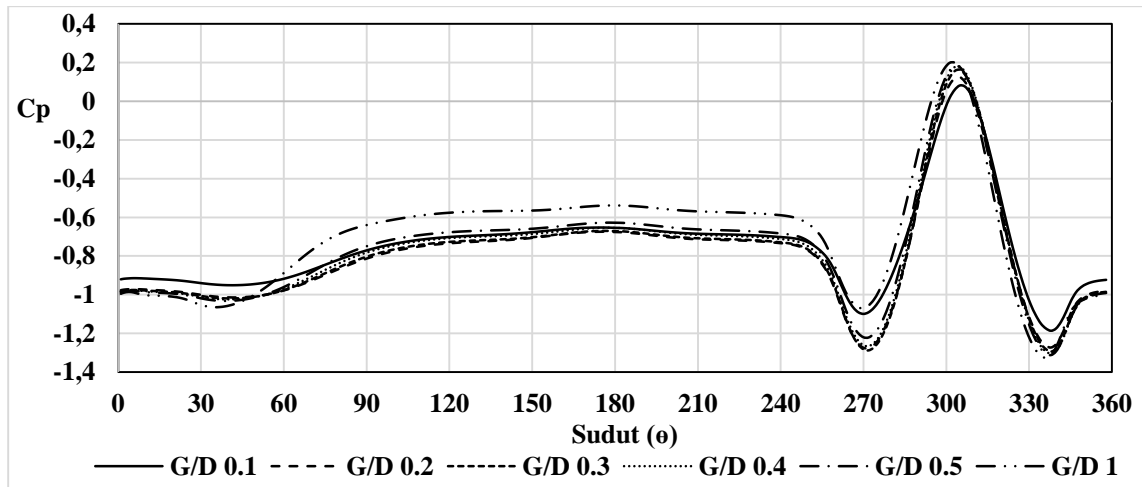
3. Grafik Nilai C_p wall silinder sirkular-1 terhadap variasi G/D pada variasi inclined wall angle (α) sebesar 20°



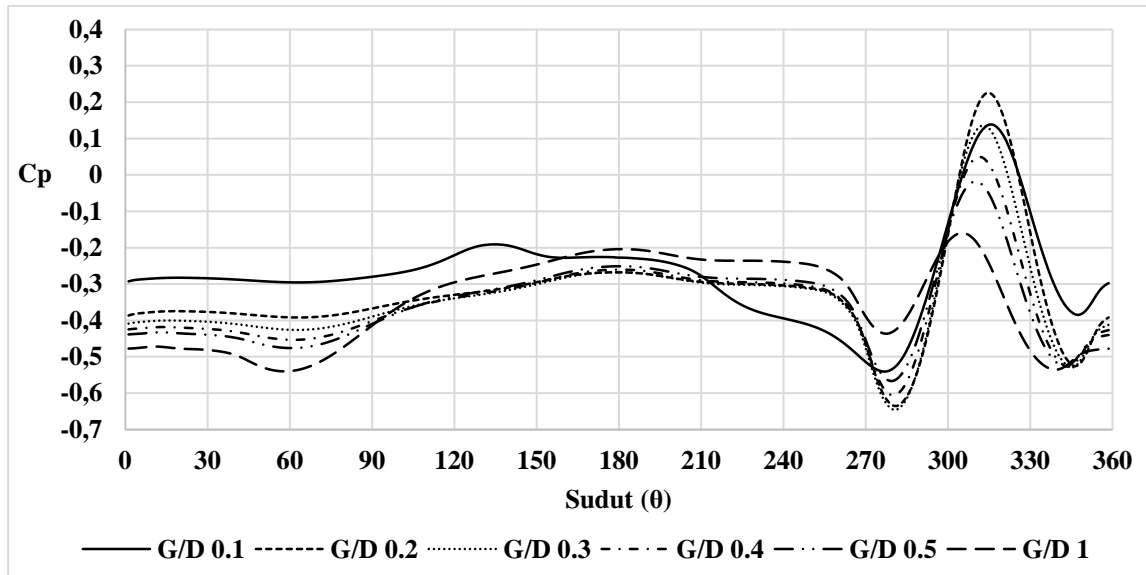
LAMPIRAN B

GRAFIK SILINDER-2

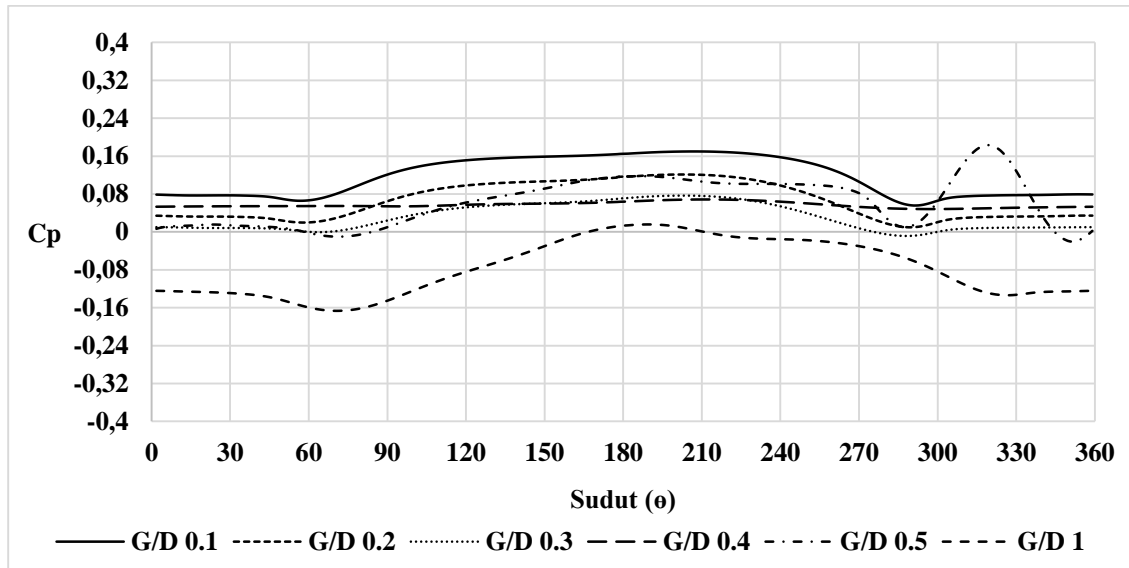
1. Grafik Nilai C_p wall silinder sirkular-2 terhadap variasi G/D pada variasi inclined wall angle (α) sebesar 0°



2. Grafik Nilai C_p wall silinder sirkular-2 terhadap variasi G/D pada variasi inclined wall angle (α) sebesar 10°

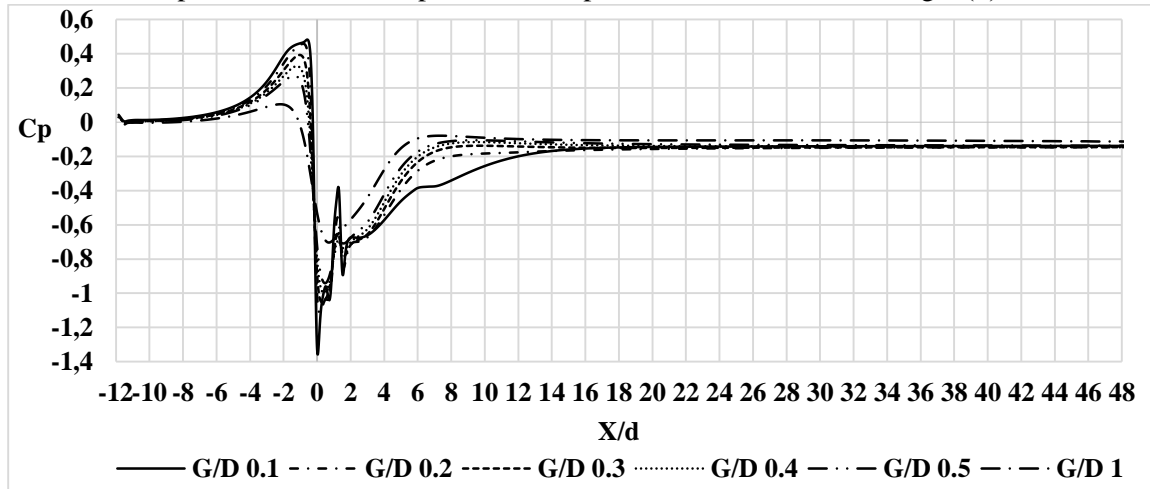


3. Grafik Nilai C_p wall silinder sirkular-2 terhadap variasi G/D pada variasi inclined wall angle (α) sebesar 20°

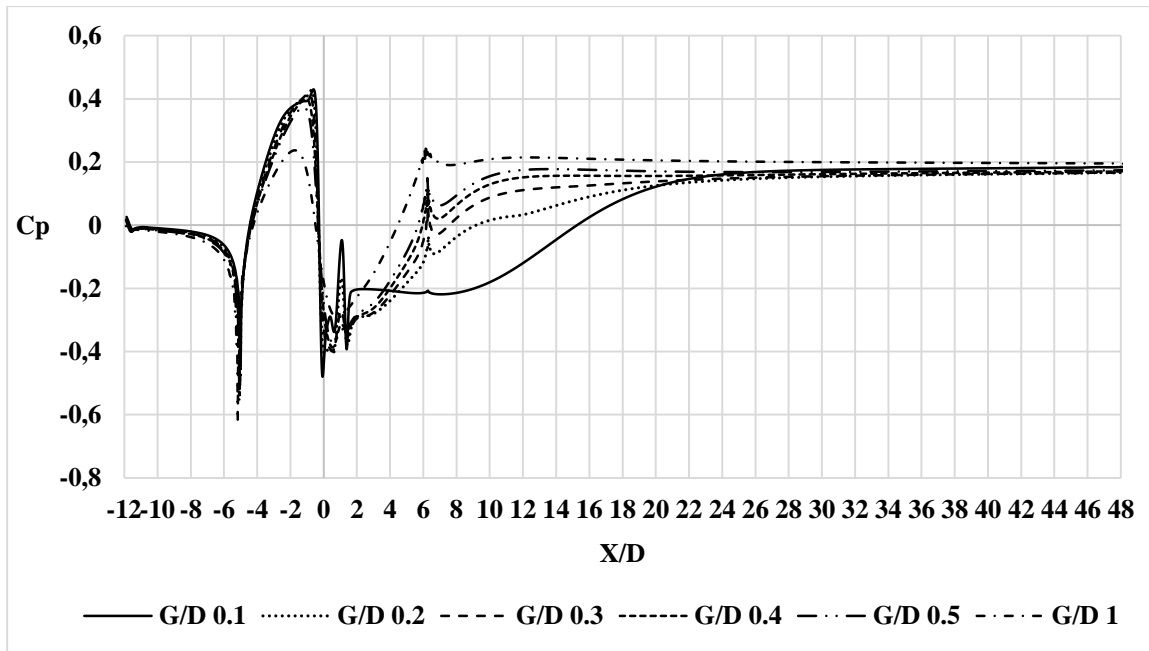


LAMPIRAN C LOWER WALL

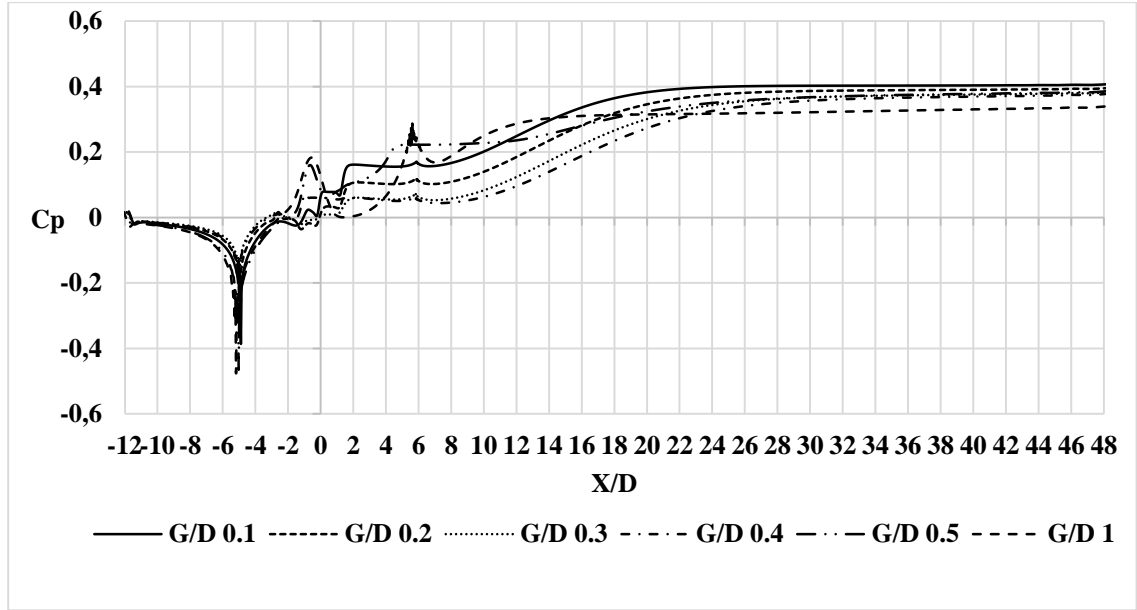
1. Grafik Nilai C_p lower wall terhadap variasi G/D pada variasi inclined wall angle (α) sebesar 0°



2. Grafik Nilai C_p lower wall terhadap variasi G/D pada variasi inclined wall angle (α) sebesar 10°



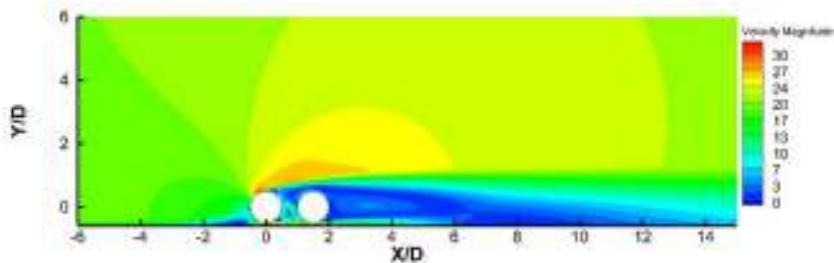
3. Grafik Nilai C_p lower wall terhadap variasi G/D pada variasi inclined wall angle (α) sebesar 20°



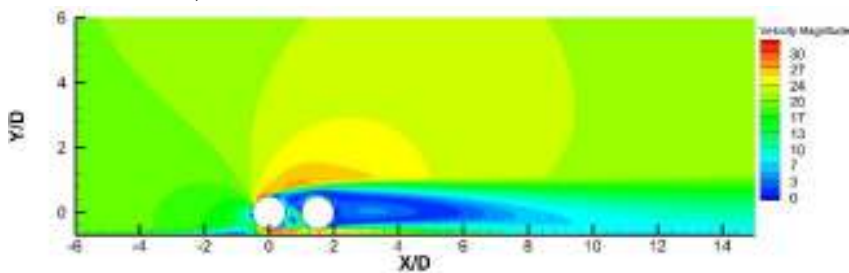
LAMPIRAN D

KONTUR KECEPATAN

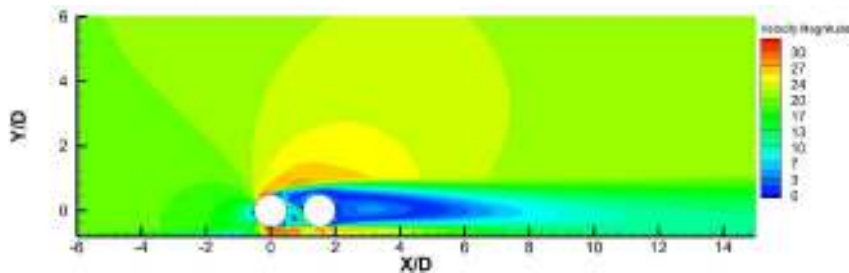
1. Kontur kecepatan pada kemiringan dinding 0° dan rasio $G/D=0,1$



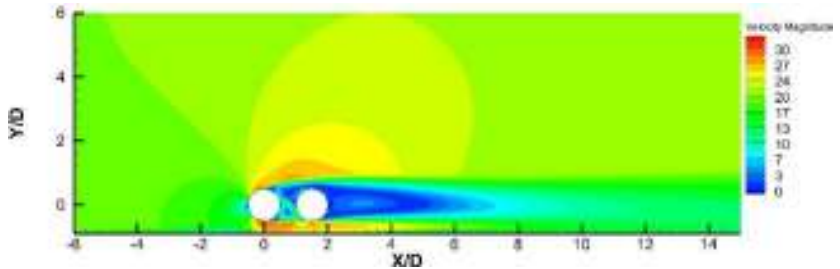
2. Kontur kecepatan pada kemiringan dinding 0° dan rasio $G/D=0,2$



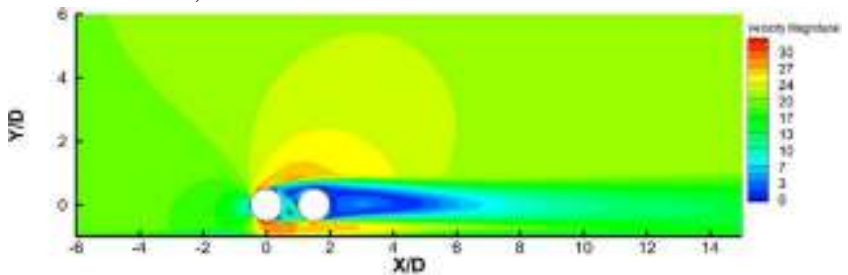
3. Kontur kecepatan pada kemiringan dinding 0° dan rasio $G/D=0,3$



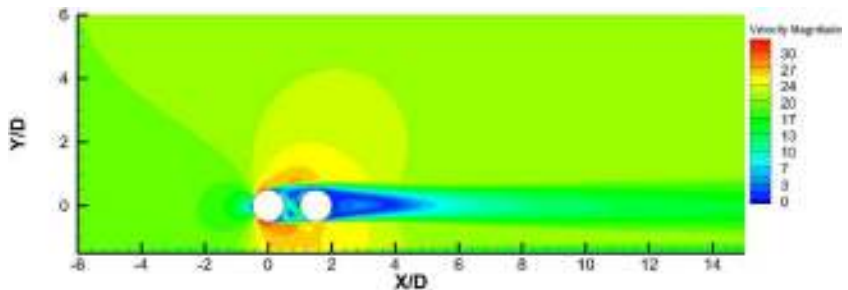
4. Kontur kecepatan pada kemiringan dinding 0° dan rasio $G/D=0,4$



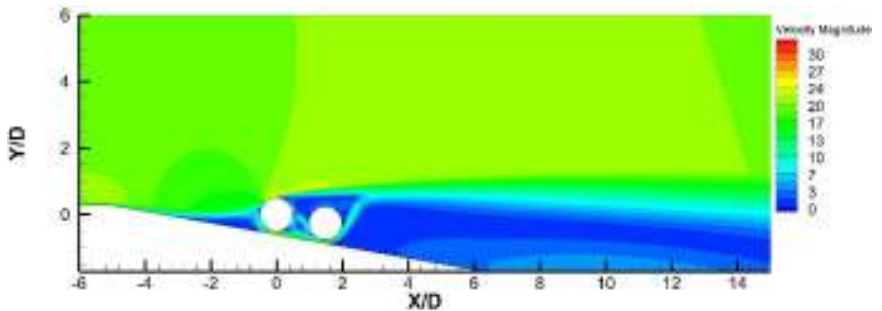
5. Kontur kecepatan pada kemiringan dinding 0° dan rasio $G/D=0,5$



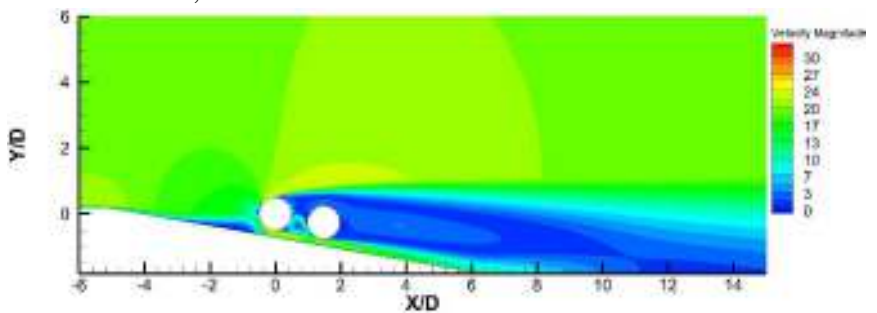
6. Kontur kecepatan pada kemiringan dinding 0° dan rasio $G/D=1$



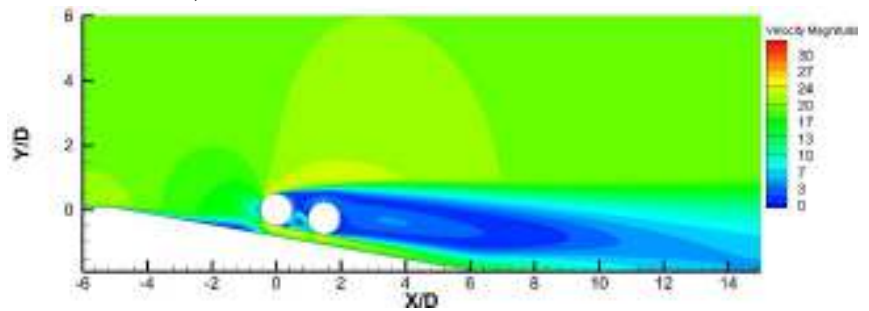
7. Kontur kecepatan pada kemiringan dinding 10° dan rasio $G/D = 0,1$



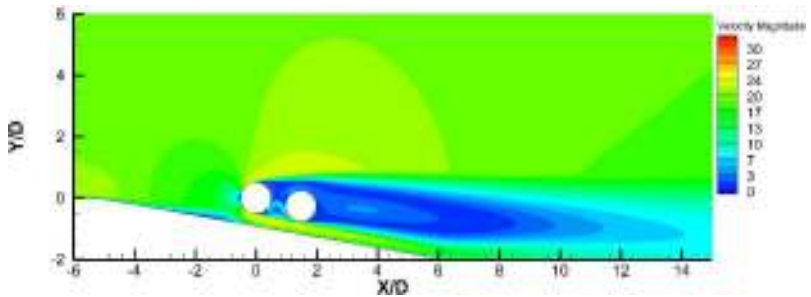
8. Kontur kecepatan pada kemiringan dinding 10° dan rasio $G/D = 0,2$



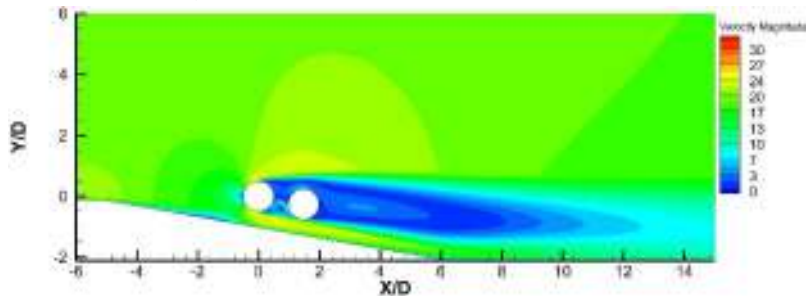
9. Kontur kecepatan pada kemiringan dinding 10° dan rasio $G/D = 0,3$



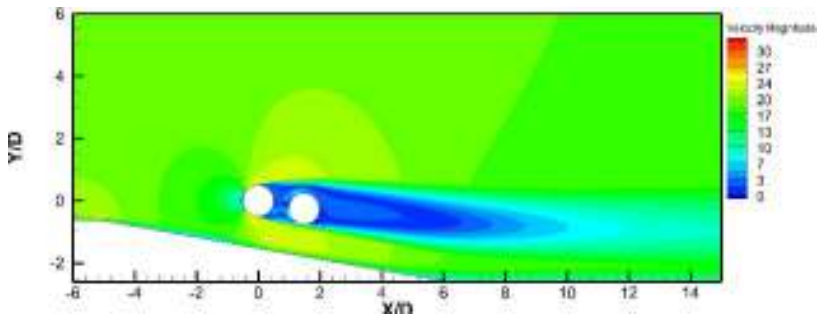
10. Kontur kecepatan pada kemiringan dinding 10° dan rasio $G/D=0,4$



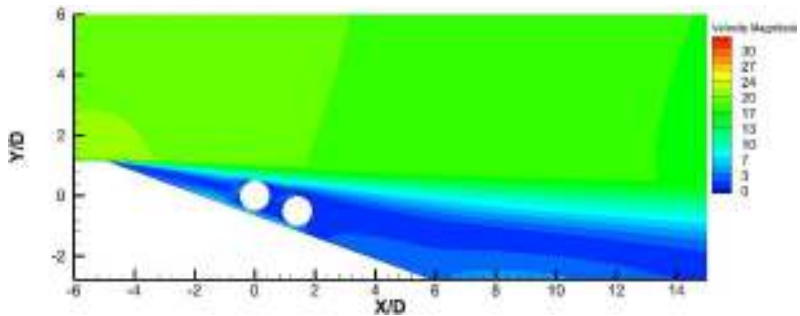
11. Kontur kecepatan pada kemiringan dinding 10° dan rasio $G/D=0,5$



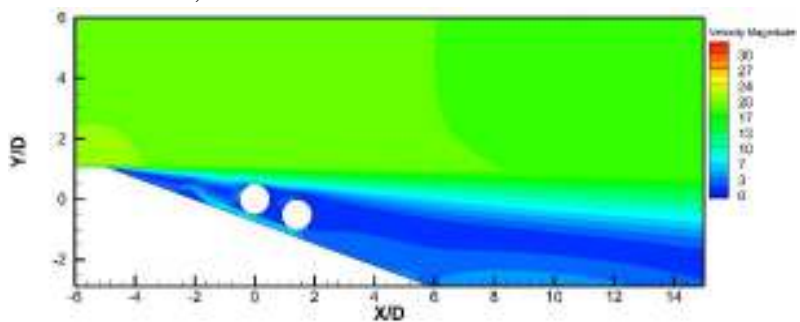
12. Kontur kecepatan pada kemiringan dinding 10° dan rasio $G/D=1$



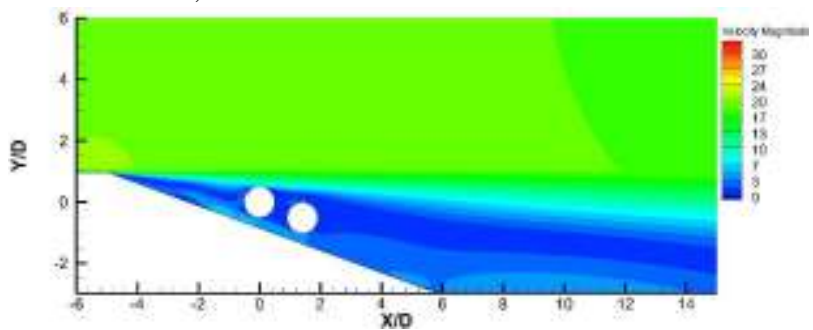
13. Kontur kecepatan pada kemiringan dinding 20° dan rasio $G/D=0,1$



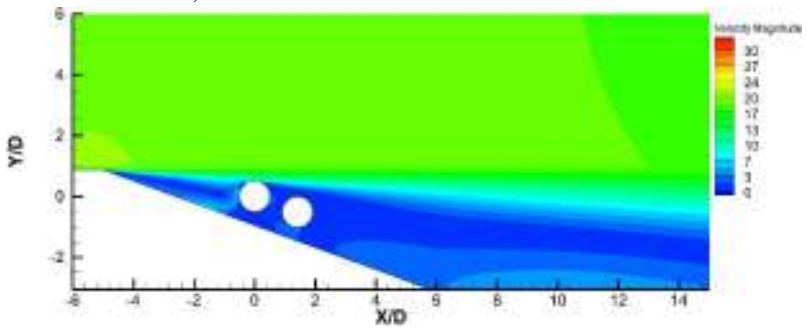
14. Kontur kecepatan pada kemiringan dinding 20° dan rasio $G/D=0,2$



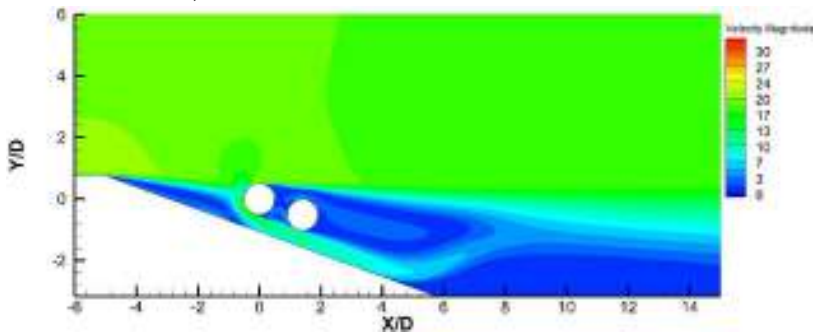
15. Kontur kecepatan pada kemiringan dinding 20° dan rasio $G/D=0,3$



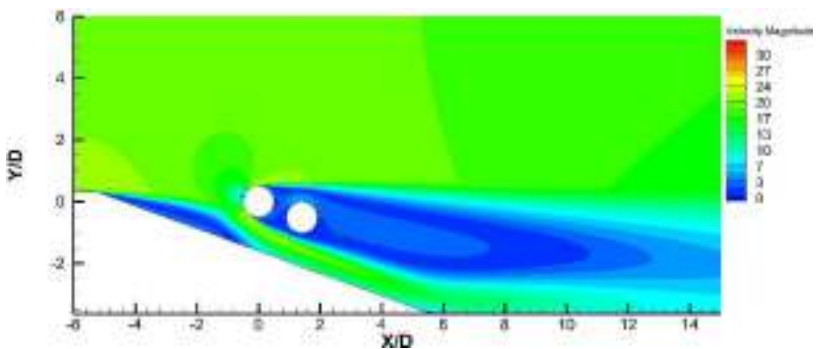
16. Kontur kecepatan pada kemiringan dinding 20° dan rasio $G/D=0,4$



17. Kontur kecepatan pada kemiringan dinding 20° dan rasio $G/D=0,5$



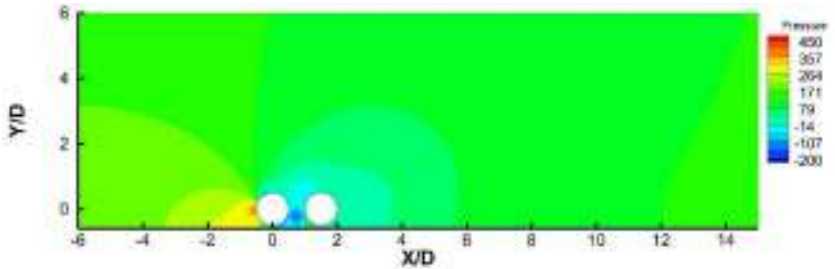
18. Kontur kecepatan pada kemiringan dinding 20° dan rasio $G/D=1$



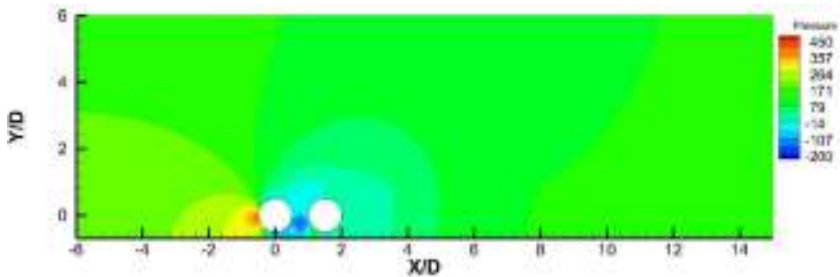
LAMPIRAN E

KONTUR TEKANAN

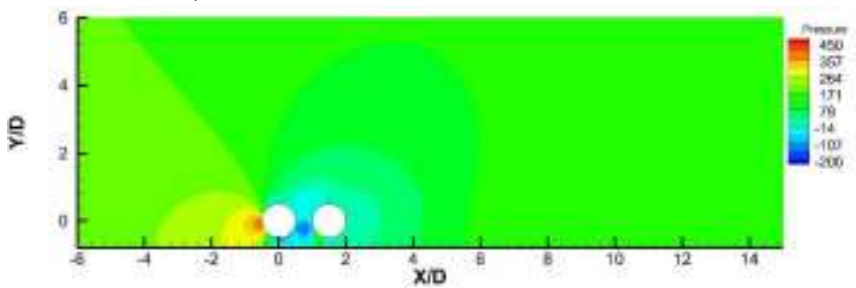
1. Kontur tekanan pada kemiringan dinding 0° dan rasio $G/D=0,1$



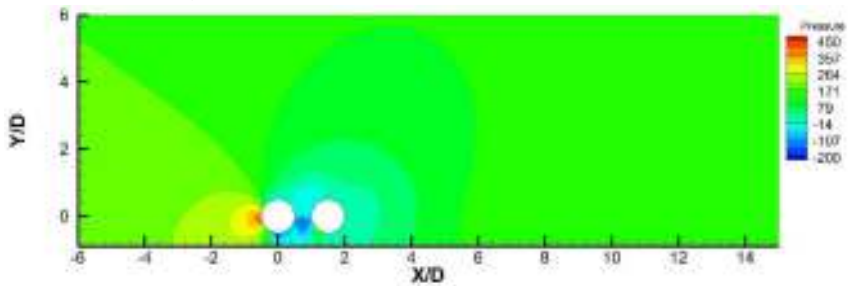
2. Kontur tekanan pada kemiringan dinding 0° dan rasio $G/D=0,2$



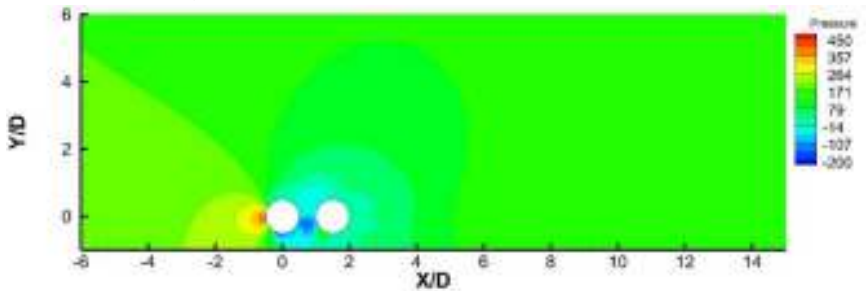
3. Kontur tekanan pada kemiringan dinding 0° dan rasio $G/D=0,3$



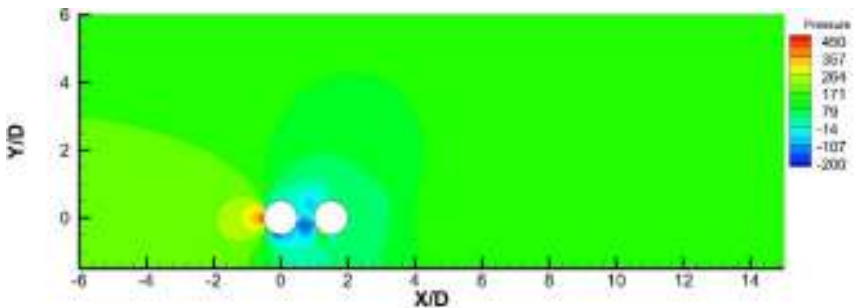
4. Kontur tekanan pada kemiringan dinding 0° dan rasio $G/D=0,4$



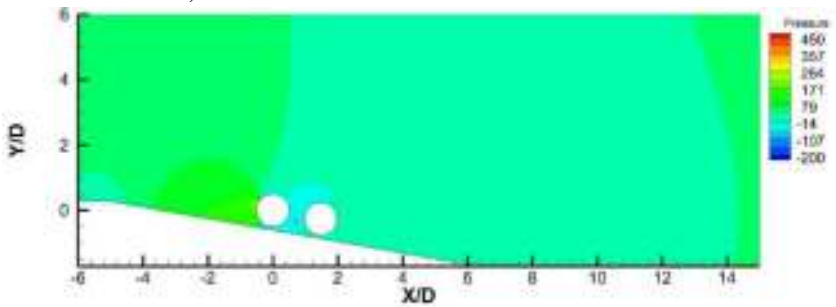
5. Kontur tekanan pada kemiringan dinding 0° dan rasio $G/D=0,5$



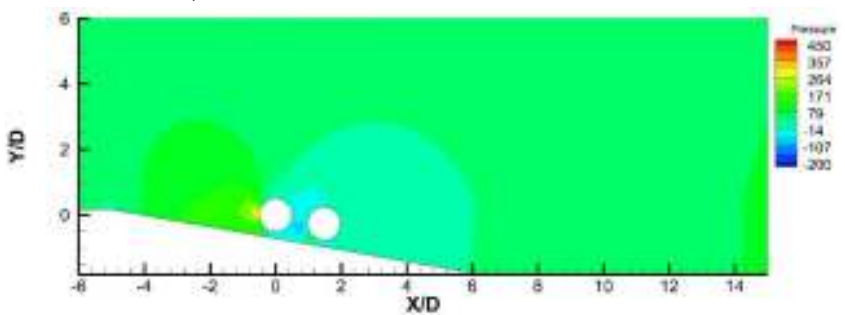
6. Kontur tekanan pada kemiringan dinding 0° dan rasio $G/D=1$



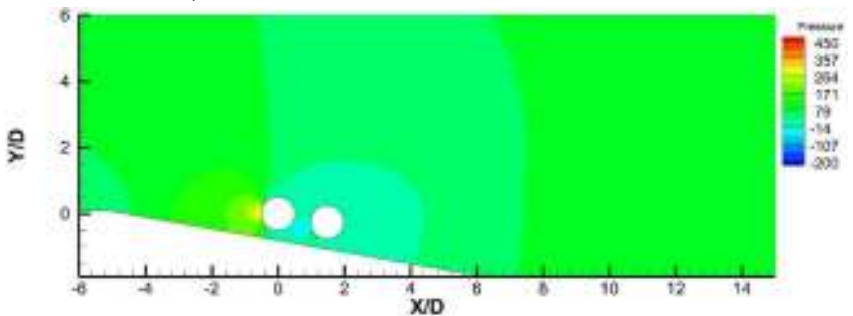
7. Kontur tekanan pada kemiringan dinding 10° dan rasio $G/D=0,1$



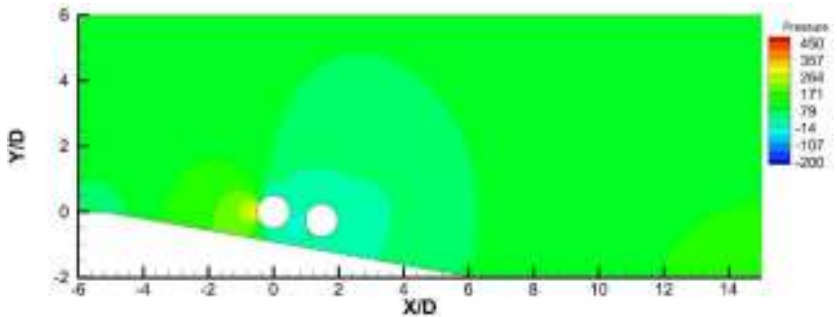
8. Kontur tekanan pada kemiringan dinding 10° dan rasio $G/D=0,2$



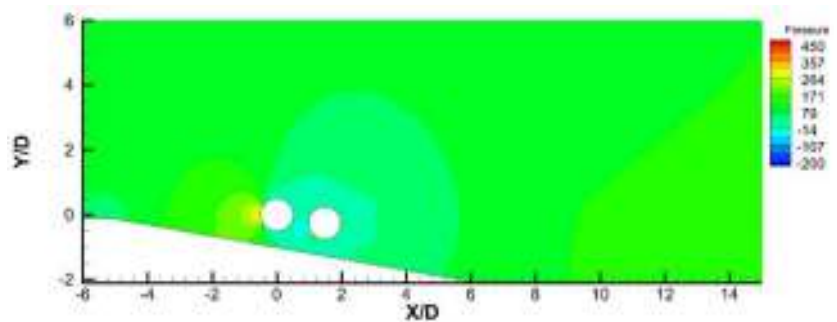
9. Kontur tekanan pada kemiringan dinding 10° dan rasio $G/D=0,3$



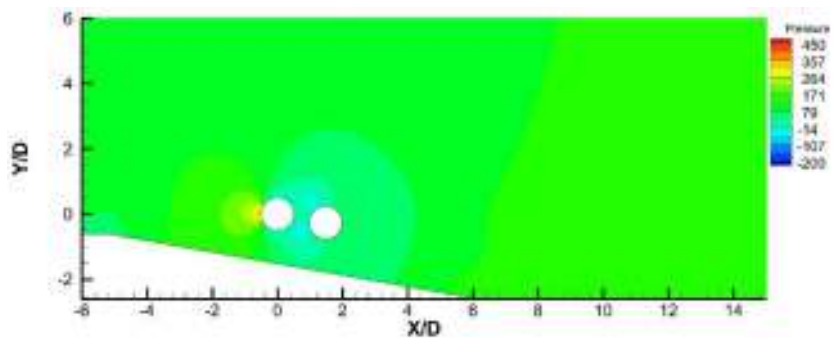
10. Kontur tekanan pada kemiringan dinding 10° dan rasio $G/D=0,4$



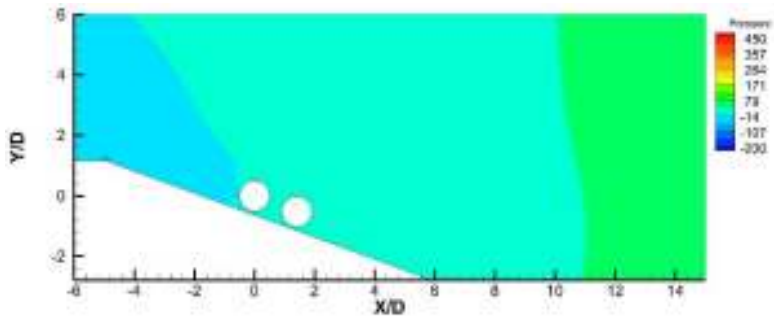
11. Kontur tekanan pada kemiringan dinding 10° dan rasio $G/D=0,5$



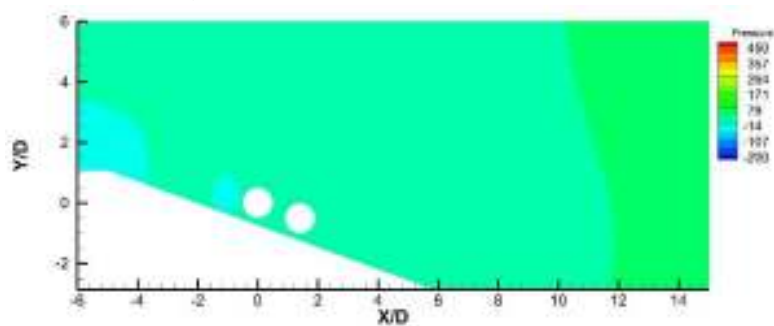
12. Kontur tekanan pada kemiringan dinding 10° dan rasio $G/D=1$



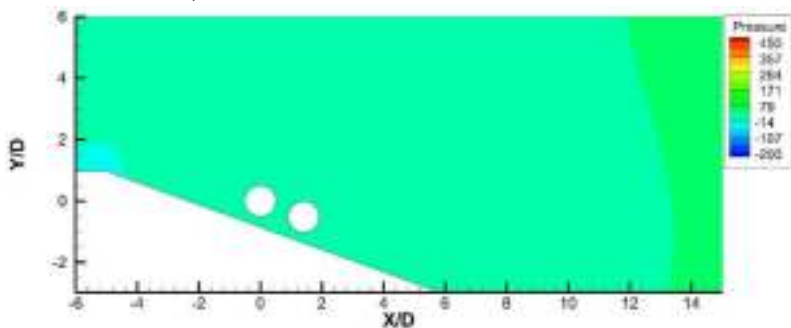
13. Kontur tekanan pada kemiringan dinding 20° dan rasio $G/D=0,1$



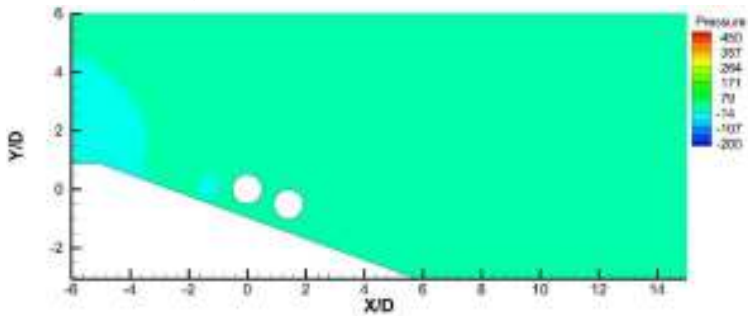
14. Kontur tekanan pada kemiringan dinding 20° dan rasio $G/D=0,2$



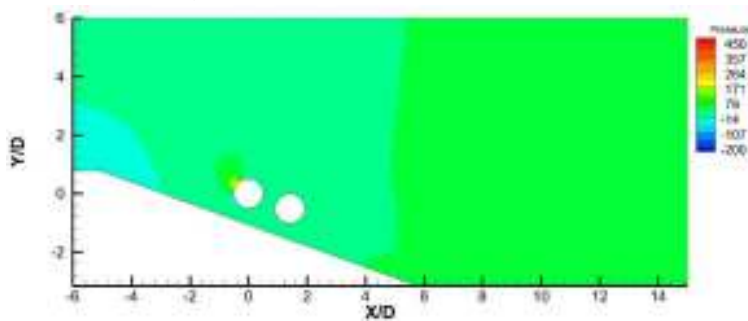
15. Kontur tekanan pada kemiringan dinding 20° dan rasio $G/D=0,3$



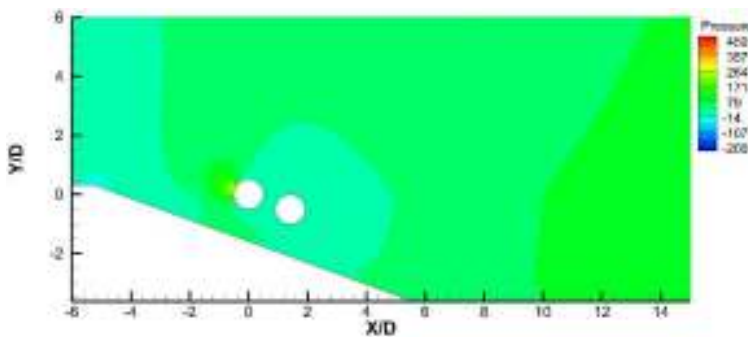
16. Kontur tekanan pada kemiringan dinding 20° dan rasio $G/D = 0,4$



17. Kontur tekanan pada kemiringan dinding 20° dan rasio $G/D = 0,5$

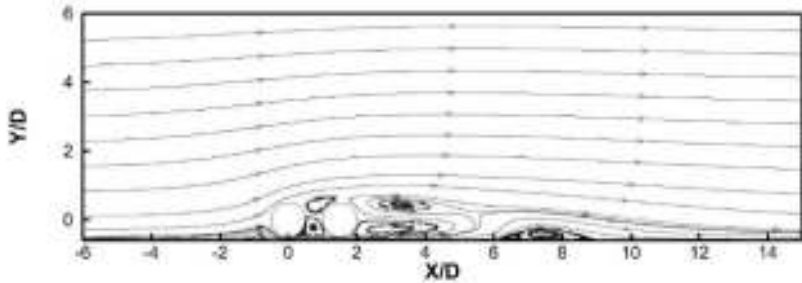


18. Kontur tekanan pada kemiringan dinding 20° dan rasio $G/D = 1$

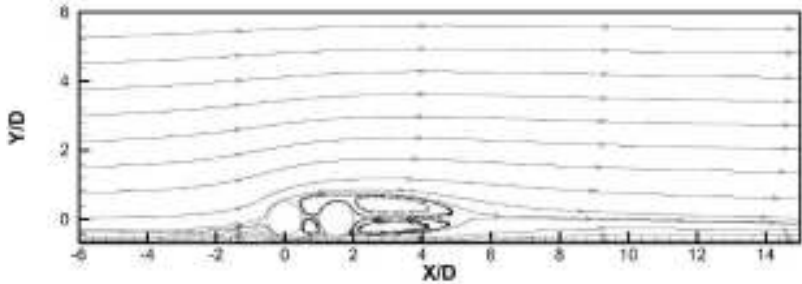


LAMPIRAN F STREAMLINE

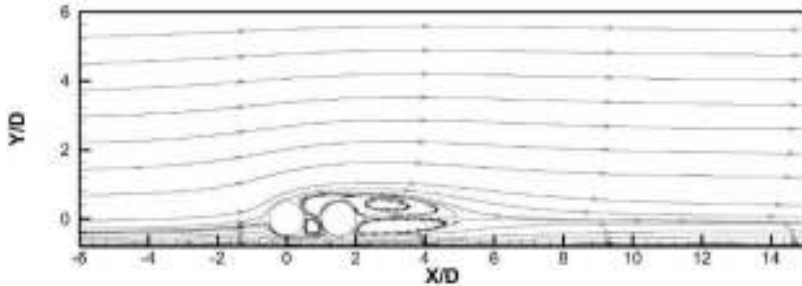
1. Streamline pada kemiringan dinding 0° dan rasio $G/D=0,1$



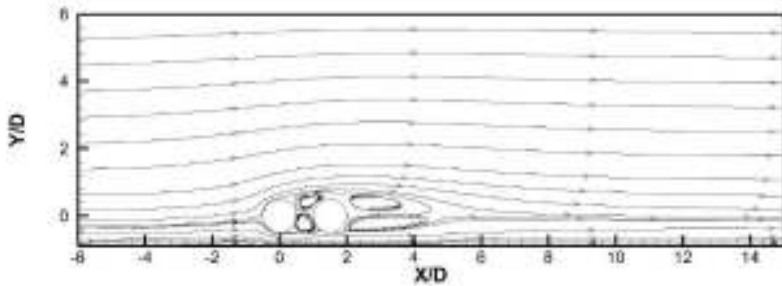
2. Streamline pada kemiringan dinding 0° dan rasio $G/D=0,2$



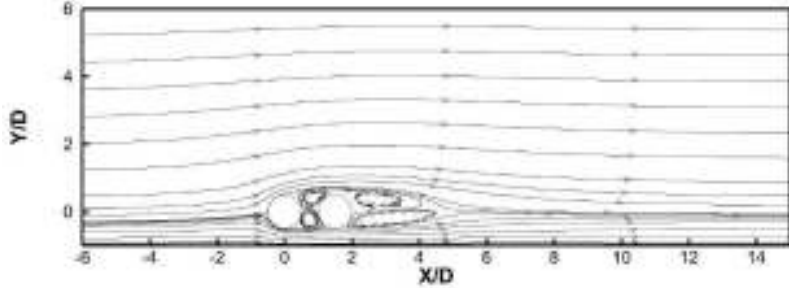
3. Streamline pada kemiringan dinding 0° dan rasio $G/D=0,3$



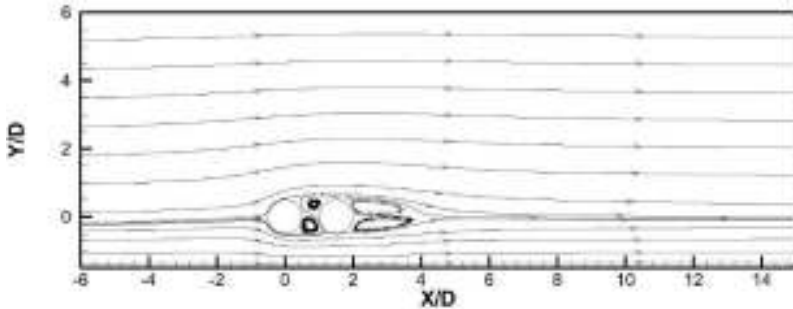
4. Streamline pada kemiringan dinding 0° dan rasio $G/D=0,4$



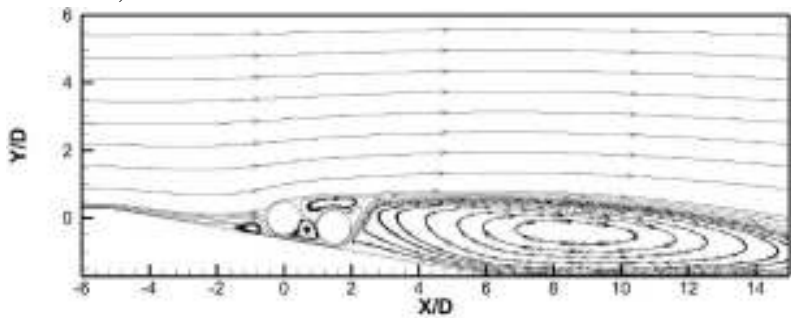
5. Streamline pada kemiringan dinding 0° dan rasio $G/D=0,5$



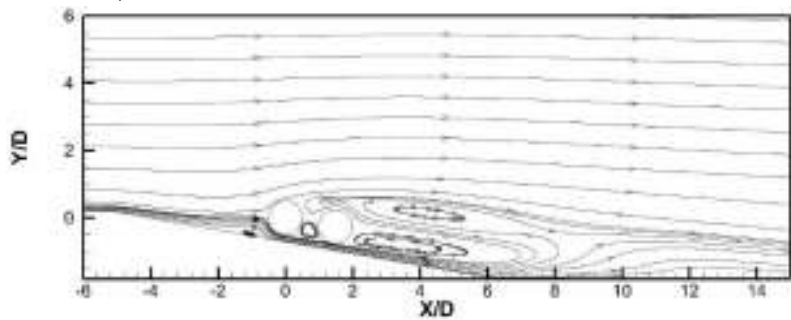
6. Streamline pada kemiringan dinding 0° dan rasio $G/D=1$



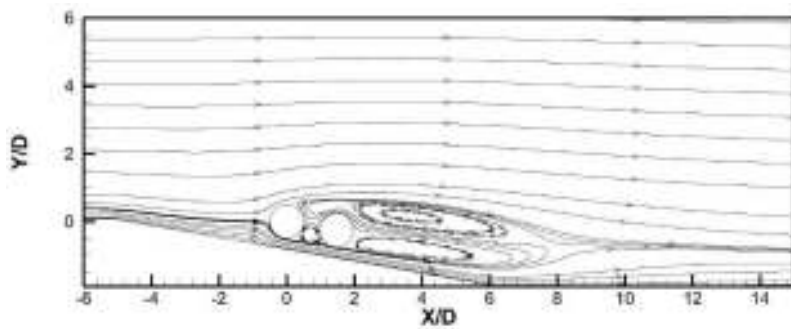
7. Streamline pada kemiringan dinding 10° dan rasio $G/D=0,1$



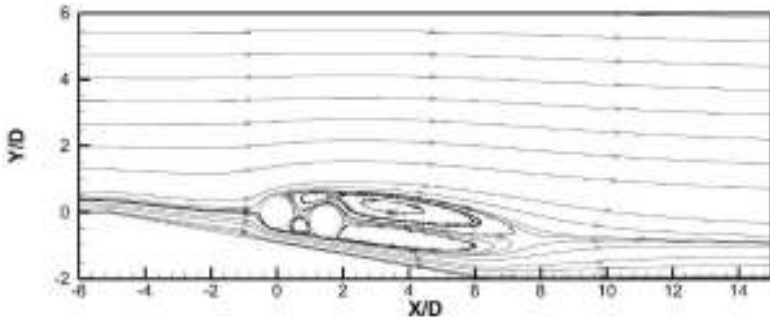
8. Streamline pada kemiringan dinding 10° dan rasio $G/D=0,2$



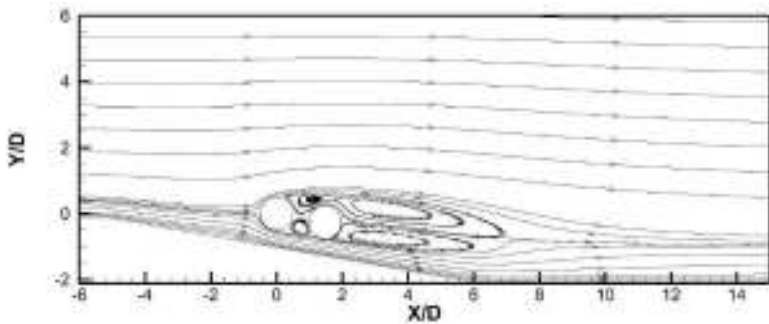
9. Streamline pada kemiringan dinding 10° dan rasio $G/D=0,3$



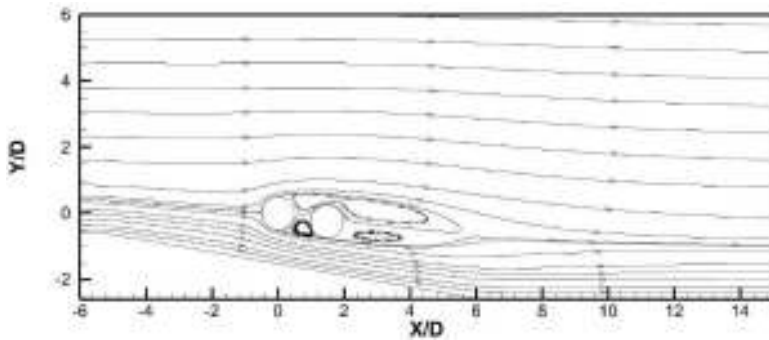
10. Streamline pada kemiringan dinding 10° dan rasio $G/D=0,4$



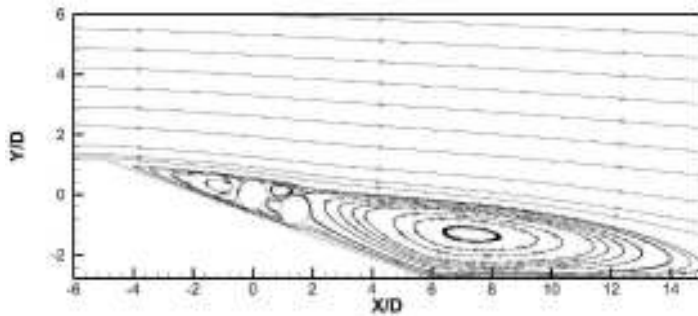
11. Streamline pada kemiringan dinding 10° dan rasio $G/D=0,5$



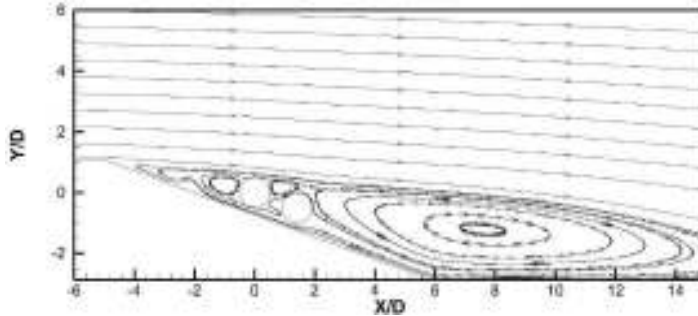
12. Streamline pada kemiringan dinding 10° dan rasio $G/D=1$



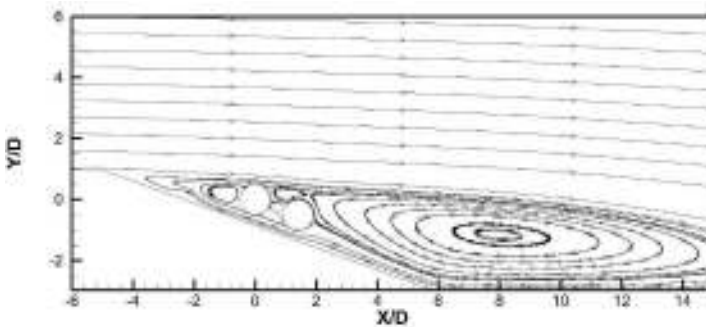
13. Streamline pada kemiringan dinding 20° dan rasio $G/D=0,1$



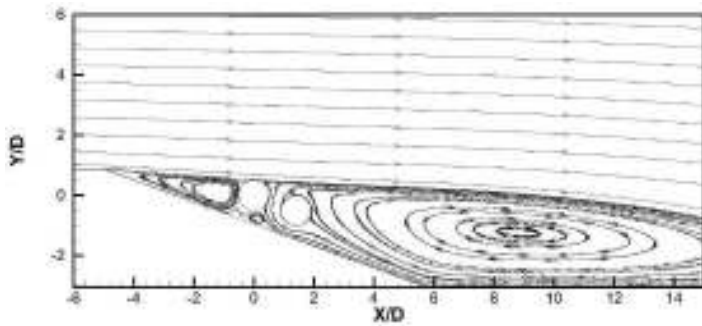
14. Streamline pada kemiringan dinding 20° dan rasio $G/D=0,2$



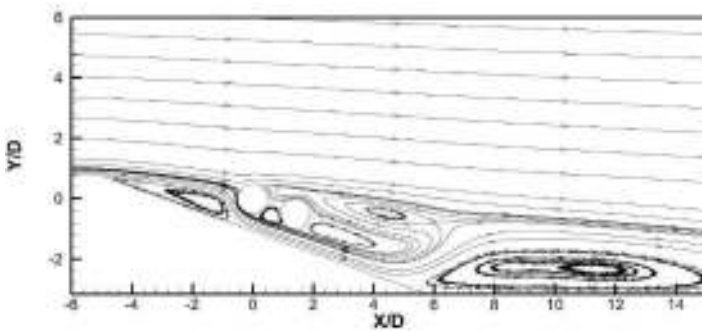
15. Streamline pada kemiringan dinding 20° dan rasio $G/D=0,3$



16. Streamline pada kemiringan dinding 20° dan rasio $G/D=0,4$



17. Streamline pada kemiringan dinding 20° dan rasio $G/D=0,5$



18. Streamline pada kemiringan dinding 20° dan rasio $G/D=1$

